IGM88D-000-691-G
CNRC 28671

LE COLLAGE STRUCTURAL DES MÉTAUX

STRUCTURAL ADHESIVE BONDING OF METALS

François G. Hamel
éditeur/editor

Présenté à l'Institut de génie des matériaux
Boucherville

Le 29 mars 1988

Presented at the Industrial Materials Research Institute
Boucherville

March 29, 1988

75 boul. de Mortagne
Boucherville (Québec)
J4B 6Y4

INTRODUCTION

La technique du collage pour l'assemblage structural de pièces métalliques offre de nombreuses possibilités et se répand de plus en plus. Elle est cependant sous-utilisée par rapport aux techniques plus conventionnelles comme le soudage et les attaches mécaniques.

Les cours donnés aux ingénieurs et aux technologues en génie font généralement une large place à l'enseignement de la conception des joints soudés et boulonnés tandis que la technique du collage est plus négligée. Cette ignorance est probablement la plus responsable des problèmes rencontrés lors de l'utilisation du collage en industrie. Ce séminaire vise à combler une partie de cette lacune.

Les résultats décevants parfois obtenus avec le collage sont souvent dûs à une mauvaise préparation des surfaces. C'est pourquoi deux présentations (M.A. Pierre-Louis et J.K. Spelt) sont consacrées à ce sujet important. La première présentation (F.G. Hamel) compare le collage aux autres techniques d'assemblages. Les deux exposés suivants traiteront respectivement des colles à prise rapide (cyanoacrylates et anaérobiques) (R. Burga) et des colles renforcées (C. Rippe). Finalement, quelques cas d'applications pratiques seront présentés.

Quelques manufacturiers de colles industrielles ont accepté de contribuer à ce séminaire et nous les en remercions ainsi que les autres conférenciers.

Nous espérons que ce séminaire sera profitable à tous en permettant de réunir des manufacturiers, des chercheurs et des utilisateurs potentiels.

François G. Hamel, organisateur
Institut de génie des matériaux

Conseil national de recherches Canada | National Research Council Canada

Institut de génie des matériaux | Industrial Materials Research Institute

75, De Mortagne, Boucherville, Qué., Canada J4B 6Y4
(514) 641-2280

LE COLLAGE STRUCTURAL DES MÉTAUX/STRUCTURAL ADHESIVE BONDING OF METALS
29 mars 1988/March 29 1988

Programme/Program

08:30 Inscription

08:50 1. AVANTAGES ET LIMITATIONS DU COLLAGE, **F.G. Hamel**, Institut de génie des matériaux

09:25 2. PRÉPARATION DE SURFACE POUR ADHÉSION OPTIMALE DES COLLES ÉPOXY, **M.A. Pierre-Louis**, H.B. Fuller Canada

10:05 **Pause**

10:20 3. SURFACE PREPARATION AND DURABILITY OF ALUMINIUM BONDED JOINTS, **J.K. Spelt**, Alcan Ltd, Kingston Research Laboratory

11:00 4. LES ADHÉSIFS CYANOACRYLATES ET ANAÉROBIQUES: LES COLLES D'ASSEMBLAGE MODERNES, **R. Burga**, Loctite Canada Inc.

11:40 5. LES ADHÉSIFS RENFORCÉS DANS LE COLLAGE STRUCTURAL, **C. Rippe**, Permabond SA, France.

12:30 **Lunch**

14:00 Démonstrations en laboratoire/laboratory demonstrations

14:30 Applications pratiques/practical applications

6. VHB: A NEW GENERATION OF ADHESIVES FOR METAL FABRICATION, **Lester Combas**, 3M Canada.

7. RAIDISSEURS DE MURS-RIDEAUX, **Guy St-Jean**, Tech-Nar Inc.

8. COLLAGE DE REFROIDISSEURS EN ALUMINIUM, **Jean Genest**, Les Échangeurs de Chaleur Universels Inc.

15:30 **Pause**

15:45 Panel et discussion.

Note: Les produits de certains manufacturiers de colle seront exposés dans le hall d'entrée.
The products of some adhesive manufacturers will be exposed in the lobby.

Canada

AVANTAGES ET LIMITATIONS DU COLLAGE

par

François G. Hamel

Institut de génie des matériaux
75 boul. de Mortagne
Boucherville (Québec)
J4B 6Y4

Le Collage Structural des Métaux
CNRC/IGM, 29 mars 1988, Boucherville (Québec)

INTRODUCTION

Le collage est souvent considéré comme une technique d'assemblage de second ordre par rapport au soudage ou aux attaches mécaniques (boulons, rivets, etc.). Rien n'est plus faux. Bien sûr, une grande quantité des colles produites sont non-structurales et servent à coller timbres, papier-peint, tapis, tuiles, emballages, etc. Il existe cependant de véritables colles structurales pouvant être utilisées pour assembler des pièces métalliques soumises à des contraintes importantes. Ces colles comprennent surtout les époxys (monocomposantes mûries à chaud et bicomposantes), les acryliques, les cyanoacrylates et les anaérobiques. Les uréthanes sont souvent réservés au collage des polymères tandis que la plupart des thermofusibles ("hot-melts") peuvent être considérées comme semi-structurales.

L'industrie aéronautique, reconnue pour ses exigences très élevées en matière de qualité et de fiabilité fait un usage important de la technologie du collage pour l'assemblage de pièces structurales telles que les structures en nid d'abeille des ailes et du fuselage. Les adhésifs utilisés sont des colles hautes performances sous forme de film nécessitant une cuisson en autoclave. De plus, des traitements de surface sophistiqués, tels que l'anodisation sont requis pour que ces colles développent leur résistance et leur durabilité optimale.

Les systèmes de collage utilisés dans l'aéronautique seraient trop coûteux pour la plupart des autres industries. Les manufacturiers de colles ont cependant mis au point des colles structurales performantes mais plus faciles d'utilisation. Dans ce texte et les suivants, il sera surtout question de ces colles structurales destinées à l'assemblage des métaux (surtout acier et aluminium) en industrie. À la fin du présent chapitre, le lecteur trouvera également une liste d'ouvrages de références sur la théorie ou l'industrie du collage, ainsi que quelques définitions de termes fréquemment utilisés.

1- AVANTAGES DU COLLAGE

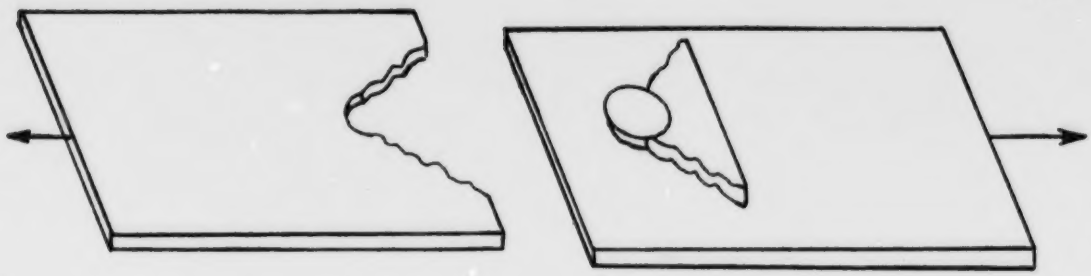
1.1 Répartition uniforme des contraintes

L'un des principaux avantages du collage est qu'il permet de répartir les contraintes sur de larges surfaces et donc de diminuer les concentrations de contraintes. Par exemple, dans le cas d'un assemblage à simple recouvrement de tôles minces au moyen d'attaches mécaniques, il existe des concentrations de contraintes importantes au bord du trou pouvant provoquer un flambage local ou une déchirure des tôles (figure 1a). Dans le cas des soudures par résistance, la transmission de l'effort par une faible surface de contact provoque en général une rupture par cisaillement du point de soudure (fig. 1b). Dans le cas d'un joint collé, où 1 est la longueur de recouvrement et t l'épaisseur des plaques, la rupture surviendra dans la plaque plutôt que dans le joint si le rapport 1/t est suffisamment élevé (fig. 1c).

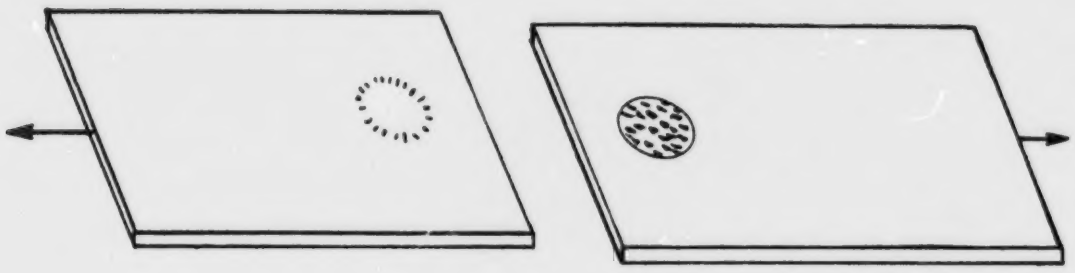
La résistance à la fatigue est en général fortement diminuée dans les zones de concentration de contraintes au voisinage des soudures ou des trous percés pour les attaches mécaniques. Comme les concentrations de contraintes sont faibles pour les joints collés, l'avantage sur les autres méthodes d'assemblage est plus marqué en fatigue qu'en sollicitation statique. De plus, des pièces cylindriques tournantes sont moins sensibles au phénomène de fatigue-fretting lorsque le joint est collé plutôt qu'assemblé par pression ("press fit").

Comme le collage prévient les déformations et le flambage locaux, il en résulte une structure plus rigide ou plus légère à rigidité égale.

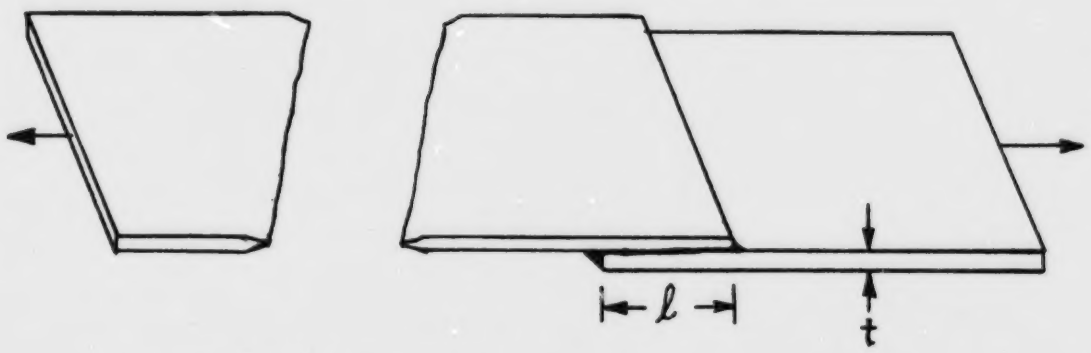
Les assemblages collés ont également la propriété d'amortir les vibrations à cause de leur module d'élasticité plus faible que les métaux. Cette propriété a également pour effet de diminuer les contraintes d'origine thermique d'autant plus que les colles ne doivent pas être chauffées à des températures aussi élevées que les joints soudés ou brasés.



a) joint riveté ou boulonné



b) joint soudé par résistance



c) joint collé

Figure 1 Ruptures observées avec différentes méthodes d'assemblage pour des joints de tôles à simple recouvrement.

1.2 Assemblage de matériaux différents

En général, le soudage est limité à l'assemblage de pièces du même matériau ou de la même famille. Le brasage et surtout les attaches mécaniques sont moins limitatifs à cet égard. Cependant, le danger d'un problème de corrosion galvanique doit toujours être considéré lorsque deux matériaux différents sont mis en contact. La colle permet d'isoler électriquement les deux pièces et de prévenir ce problème. Grâce au collage, des matériaux aussi différents que métal et caoutchouc peuvent être assemblés par collage.

1.3 Isolation électrique et thermique

Pour l'assemblage de circuits électroniques, la colle permet d'effectuer facilement un joint isolé électriquement. Par contre, si le joint doit être conducteur, il existe des colles chargées de poudres métalliques conçues à cet effet. La conductivité thermique relativement faible des colles, est utile pour la fabrication de cadres de fenêtres tout en assurant l'étanchéité nécessaire. Cette étanchéité contribue à protéger contre la corrosion en empêchant l'infiltration d'humidité. Les phares d'automobile et les ampoules électriques sont scellés par collage.

1.4 Assemblages de laminés ou de particules

Plusieurs produits laminés sont assemblés par collage: contre-plaqué, verre de sûreté, articles de sport (skis, raquettes), sandwich métal-polyuréthane-métal, etc. Le collage permet également de joindre des particules: roues abrasives, papier abrasif, plaquettes de frein, panneaux-particules. Les structures en nid d'abeilles utilisées en aéronautique sont collées et procurent un rapport rigidité/poids très élevé. Finalement, les composites (ex.: fibre de verre-époxy) peuvent être considérées par extension comme des pièces collées.

1.5 Élimination des défauts de surface

Le collage permet d'obtenir des surfaces lisses ce qui permet d'améliorer l'esthétisme et l'aérodynamisme. C'est pourquoi les raidisseurs de capots d'automobiles sont collés plutôt que soudés par résistance afin d'éviter les empreintes laissées par les électrodes. De même, le collage des tôles de fuselage d'avion permet d'éviter les rivets extérieurs qui nuisent à l'aérodynamisme.

1.6 Coût

Pour plusieurs applications, le collage permet de faire des assemblages plus rapidement et à moindre coût en réduisant le nombre de pièces et les opérations de machinage. Les pièces mécaniques comme les roulements assemblés par collage exigent des tolérances de machinage moins sévères.

2- LIMITATIONS DU COLLAGE

2.1 Résistance à la température et à l'environnement

La plupart des colles structurales sont à base de polymères et possèdent une résistance limitée aux températures élevées. Les époxys présentent une diminution graduelle de leurs propriétés mécaniques entre 80 et 150°C. Au-delà d'environ 250°C, la colle se dégrade de façon irréversible. Certaines colles spéciales (époxy-phénolique et polyimide) peuvent cependant atteindre des températures d'opération d'environ 350-450°C. Certaines colles inorganiques comme des ciments pour réfractaires et céramiques peuvent atteindre des températures beaucoup plus élevées mais sont en général fragiles et ne sont pas destinées au collage des métaux. La plupart des colles courantes ont donc une résistance à la température bien inférieure aux soudures et aux attaches mécaniques, ce qui constitue actuellement leur principale limitation.

De nombreuses colles comme la plupart des polymères sont sensibles à l'humidité et peuvent se dégrader avec le temps par diffusion. L'interface métal-colle ou la couche d'oxyde métallique de surface est particulièrement sensible à la dégradation sous contraintes par hydrolysation en milieu humide. Ce problème, surtout pour l'aluminium, peut être combattu par un traitement de surface spécifique avant le collage. Cet aspect sera traité dans les deux exposés suivants.

2.2 Résistance mécanique

La résistance mécanique absolue des colles comme matériau est bien inférieure à celle des métaux. Pour cette raison, il est inconcevable de pouvoir songer à un joint collé bout à bout de plaques d'acier épaisses car la résistance mécanique de l'ensemble serait très inférieure à celle des plaques. Les joints collés sont en général conçus de façon à transmettre les efforts par cisaillement au moyen de joints à recouvrement de telle sorte que la surface collée soit très supérieure à la section des plaques. Il en résulte donc que cette technique est surtout limitée aux structures de faibles épaisseurs.

Les joints collés doivent également être conçus de façon à limiter les contraintes de pelage et de clivage auxquelles les colles sont peu résistantes (voir section 5).

2.3 Démontage difficile

Le collage est généralement réservé aux structures permanentes. Lorsque la possibilité de démontage de la structure est nécessaire, il est préférable d'avoir recours aux attaches mécaniques.

2.4 Coût de l'équipement

Certains types de colles nécessitent l'utilisation d'équipements coûteux tels que presses, autoclaves, bains de nettoyage, gabarits, etc. Cependant,

pour plusieurs applications courantes, l'équipement de base est beaucoup moins coûteux que celui des machines à souder.

2.5 Temps de prise

Pour la plupart des colles, le temps de prise est relativement long même s'il peut être accéléré par chauffage. Durant cette période, l'assemblage doit être maintenu par des gabarits appropriés, ce qui peut devenir onéreux si les cadences de production sont élevées. Seules les colles cyanoacrylates et les anaérobiques mûries par ultra-violet durcissent en quelques secondes.

2.6 Durée d'entreposage et d'utilisation

La durée d'entreposage ("shelf life") de plusieurs colles monocomposantes ou en film est limitée à quelques mois ce qui peut entraîner des pertes d'inventaire. Certaines colles en film utilisées dans l'aéronautique doivent même être réfrigérées. Le temps d'utilisation ("pot life") qui s'applique aux colles bicomposants impose certaines contraintes de production et implique des pertes des surplus inutilisés.

2.7 Contrôle de qualité compliqué

Parmi les méthodes utilisées pour l'inspection non-destructive des joints collés, on peut citer les ultrasons, les méthodes opto-thermiques et des méthodes de résonnance mécaniques. La plupart des méthodes peuvent détecter les régions d'un manque de collage local mais non la qualité du joint de colle. Cependant, il existe quelques appareils (ref. 19, chap. 15) basé sur le principe de l'impédance acoustique qui peuvent fournir une indication de la qualité du joint de colle après une calibration adéquate. Ces méthodes sont par contre beaucoup moins pratiques et moins bien standardisées que celles couramment utilisées pour l'inspection des soudures.

2.8 Santé et sécurité

Certaines colles contiennent des solvants volatiles nécessitant une ventilation appropriée. La tendance dans l'industrie est de les remplacer par des colles à base d'eau. Les colles structurales sans solvant posent moins de problèmes à ce niveau sauf les colles acryliques dont un des composants dégage une forte odeur. Les fabricants de colles cherchent à éliminer ce problème surtout pour rencontrer les normes de l'industrie automobile. À l'état mûri, les colles sont en général non-toxiques.

3- COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ASSEMBLAGE

Le tableau 1 (tiré de la référence 8) compare les différentes méthodes d'assemblage. Ce tableau illustre que le collage présente de nombreux avantages discutés précédemment dont un meilleur fini de surface, une répartition uniforme des contraintes et une excellente résistance en fatigue. Aux températures élevées, il ne peut compétitionner avec le soudage et les attaches mécaniques et seule cette dernière méthode permet de réaliser des assemblages facilement démontables. Le collage est aussi défavorisé par un taux de production plus faible et une préparation de surface parfois délicate.

4- SYSTÈMES DE COLLAGE

Lors du choix d'une colle, il faut considérer non seulement ses propriétés mécaniques et son coût d'achat mais le coût de l'ensemble de l'opération de collage, incluant l'entreposage, l'application et le mûrissement de la colle. Le tableau 2 résume les différentes propriétés à chacune des étapes et leur influence sur différents aspects contribuant aux coûts de production et de service après-vente.

Toutes les propriétés d'une colle contribuent au coût final du produit et doivent être considérées dès le début au moment de la conception initiale,

Tableau 1 Comparaison des différentes méthodes de collage (d'après la ref. 8).

	Welding	Brazing and soldering	Mechanical fastening	Adhesive bonding
	Permanent joints	Usually permanent (soldering may be non-permanent	Threaded fasteners permit disassembly	Permanent joints
	Local stress points in structure	Fairly good stress distribution	Points of high stress at fasteners	Good uniform load distribution over joint area (except in peel)
Joint features	Joint appearance usually acceptable. Some dressing necessary for smooth surfaces	Good appearance joints	Surface discontinuities sometimes unacceptable	No surface marking. Joint almost invisible
	Generally limited to similar material groups	Some capability of joining dissimilar metals	Most forms and combinations of materials can be fastened	Ideal for joining most dissimilar materials
	Very high temperature resistance	Temperature resistance limited by filler metal	High temperature resistance	Poor resistance to elevated temperatures
	Special provision often necessary to enhance fatigue resistance	Fairly good resistance to vibration	Special provision for fatique and resistance to loosening	Excellent fatigue properties. Electrical resistance reduces corrosion at joints
Joint preparation	Little or none on thin material. Edge preparation for thick plates	Pre-fluxing often required (except for special brazing processes)	Hole preparation and often tapping for threaded fasteners	Cleaning often necessary
Post processing	Heat treatment sometimes necessary	Corrosive fluxes must be cleaned off	Usually no post-processing--occasionally retightening in service	Not often required
Equipment	Relatively expensive, bulky and often requires heavy power supply	Manual equipment cheap. Special furances and automatic units expensive	Relatively cheap, portable and can be used for 'on-site' assembly	Only large multi-feature epoxide and polyurethane dispensers are expensive
Consumables	Wire, rods, etc. fairly cheap	Some special brazing fillers expensive. Soft solders cheap	Quite expensive	Structural adhesives quite expensive
Production rate	Can be very fast	Automatic processes quite fast	Joint preparation and manual tightening slow. Mechanised tightening fairly rapid	Seconds to hours, according to type
Quality assurance	N.D.T. methods applicable to most processes	Inspection difficult particularly on soldered electrical joints	Reasonable confidence in torque-control tightening	N.D.T. methods limited

Tableau 2 Caractéristiques des systèmes de collage

Étapes de production	Propriétés	Influence sur le coût	
entreposage	stabilité	conservation	
application	présentation viscosité toxicité	manutention équipement d'application ventilation	domaine de l'ingénieur de fabrication
mûrissement	type de mûrissement (chaleur, UV, activateur, etc.) 1 ou 2 composantes viscosité	équipement rapidité main d'oeuvre fixations, gabarits espace de travail	
service	résistance mécanique résistance à la chaleur résistance à l'humidité conductivité	design garantie service	domaine de l'ingénieur de design

après discussion entre les responsables de la conception et de la fabrication. Ainsi, un assemblage collé au moyen d'une colle moins performante nécessitant des pièces plus coûteuses pour augmenter les surfaces de contact pourrait être plus économique grâce à un coût de fabrication moindre.

5- CONTRAINTES DANS LES JOINTS COLLÉS

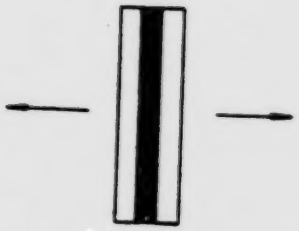
La figure 2 illustre les quatre types de contraintes auxquels peuvent être soumis les joints collés. En général, les colles sont peu résistantes aux contraintes de pelage et de cisaillement puisque les efforts sont concentrés sur une faible partie du joint. Les efforts sont beaucoup mieux répartis en traction et en cisaillement. En pratique, les joints en traction sont peu pratiques à réaliser puisque de faibles désenlignements introduisent d'importantes sollicitations de clivage.

La plupart des joints collés sont conçus de façon à transmettre les efforts par cisaillement. Cependant, à cause de la déformation des supports, la contrainte de cisaillement n'est pas uniforme dans le joint mais concentrée aux extrémités. Il en résulte donc que la force de rupture d'un joint collé n'est proportionnelle à la longueur de recouvrement que pour de faibles longueurs de recouvrement. Pour des recouvrements plus longs, la force tend asympotiquement vers une valeur limite de la force. Cette valeur est atteinte pour des recouvrements correspondant à environ 10 à 20 fois l'épaisseur. Cependant, des recouvrements plus longs d'environ 50 fois l'épaisseur contribuent à améliorer la résistance au fluage en diminuant la contrainte de cisaillement au centre du joint.

Les joints à simple recouvrement, à cause du décalage des deux supports, sont également soumis à un moment de flexion induisant une rotation du joint. Cette rotation tend à produire des contraintes de pelage aux extrémités des recouvrements et donc à diminuer la résistance du joint. Ces contraintes de pelage peuvent être diminuées en utilisant des joints balancés ainsi qu'en

- TRACTION

  - RÉPARTITION UNIFORME DES CONTRAINTES
  - DIFFICILE À RÉALISER EN PRATIQUE
  - PROBLÈMES D'ALIGNEMENT



- CISAILLEMENT

  - RÉPARTITION DES CONTRAINTES SUR UNE GRANDE SURFACE
  - CAS IDÉAL POUR LES COLLES
  - S'ACCOMPAGNE TOUJOURS D'UN PEU DE PELAGE OU CLIVAGE

- PELAGE

  - UN OU DEUX ADHÉRENDS FLEXIBLES
  - CONCENTRATION DES CONTRAINTES
  - À ÉVITER

- CLIVAGE

  - 2 ADHÉRENDS RIGIDES
  - CONCENTRATION DES CONTRAINTES
  - À ÉVITER

Figure 2 Types de contraintes dans les joints collés

utilisant des supports aux extrémités biseautées.

Il est très important dans la conception d'un joint collé de chercher à réduire les concentrations de contraintes ainsi que les efforts de pelage. Il faut donc chercher à obtenir des efforts de cisaillement uniformément répartis. Différents types de joints sont illustrés à la figure 3 du chapitre 4 (par R. Burga).

RÉFÉRENCES UTILES SUR LE COLLAGE

1- Guide du collage, H. Montenot, CETIM, Paris 1978.

Avantages: Français, bref mais complet.
Désavantages: Nomenclature française peut parfois être source de confusion.

2- Adhesive Technology Handbook, A.H. Landrock, Noyes Publications, New Jersey 1985.

Avantages: Récent et très complet.
Désavantages: Section sur les standards inutilement longue.

3- ASTM Standard Volume 15.06 ASTM Philadelphia.

Essais, préparation de surface, définitions.

4- Handbook of Adhesives, 1. Skeist, 2e ed., Van Nostrand Reinhold, New York (1977).

Excellent, très complet, chapitres sur les colles puis chapitres sur les adhérends. Guide de sélection très pratique.

5- Adhesives in Engineering Design, Lees, W.A., The Design Council, Springner-Verlag (1984).

Avantages: Récent, guide de sélection (disponible sur ordinateur).
Désavantages: Incomplet.

6- Durability of Structural Adhesives, A.J. Kinloch, Applied Science Publishers, London (1983).

Excellent et complet sur ce sujet particulier. Théorie, colles, adhérends, préparation de surfaces et applications.

7- Developments in Adhesives, A.J. Kinloch, ed., Applied Science Publishers, London (81).

Dix chapitres par des auteurs différents. Excellent, mais incomplet comme livre d'introduction.

8- High Performance Adhesive Bonding, G. de Frayne, ed., SME, Michigan (1983).

Vingt-sept (27) auteurs, qualité variable. Certains chapitres très intéressants.

9- Structural Adhesives, Chemistry and Technology, S.R. Hartshorn, ed., Plenum Press, New York (1986).

10- Adhesives Handbook, J. Shields, 3rd ed., Newnes-Butterworths, London (84).

Très complet, en particulier sur les colles spécifiques (désignation et fabricant) et sur les propriétés. Difficile à consulter (pas d'index). Designations européennes des colles.

11- Adhesives, desk top data bank, edition 3, The International Plastic Selector, 1980 + suppléments annuels.

Forme d'annuaire. Très bien indexé par manufacturier, composition chimique, nom commercial et paire d'adhérends. Index croisés.

12- Adhesives Red Book. Maintenant incorporé dans un numéro annuel spécial de Adhesive age. Annuaire des compagnies de colle, d'équipements, de services et de produits connexes. Classé par compagnie et sujet. Section séparée pour le Canada

13- Advances in Adhesves, applications, materials and safety, D. Brewis and J. Comyn, ed., Warwick Publishing, Birmingham (1983).

Anglais (UK): la partie sur la législation ne peut s'appliquer directement ici. Le chapitre sur les colles structurales est écrit par Lees de Permabond: même réserve que réf. 5

14- Adhesives, Adherends, Adhesion, N.J. DeLollis, R.E. Knieger Publishing Co. (1980).

2e édition d'un livre original datant de 1970. Certaines parties du livre n'ont pas été renouvelées.

15- Treatise on Adhesion and Adhesives, R.L. Patrick, Marcel Dekker Inc., 5 volumes, New York (73, 76, 81).

Autres livres à plusieurs auteurs. Ne forment pas des livres complets.

16- Adhesives and Adhesive Bonding, G. Epstein ed., T/C Publications, El Segundo, California.

Recueil de notes de cours, difficile à consulter.

17- Structural Adhesives, Developments in Resins and Primers, Kinlock, A.J., Elsevier Applied Science Publishers, London (1986).

Livre à plusieurs auteurs. Développement les plus récents. Ne pas choisir comme livre de référence.

18- Adhesion and Adhesives, Science and Technology, Kinloch, A.J., Chapman and Hall, London (1987). Récent et très complet.

19- Adhesive Bonding of Aluminium Alloys, Thall, E.W. and Shannon, R.W., eds, Marcel Dekker, New York and Basel (1985).

Livres à plusieurs auteurs mais conçu de façon à former un ensemble complet. Excellent.

20- Encyclopedia of Materials Science and Engineering, M.B. Bever, ed., Pergamon Press (1986). 8 volumes. Excellent, très complet, très à jour, plusieurs références.

Périodiques

- Adhesives Age

- Machine design.

DÉFINITIONS

ADHÉSIF:	MATIÈRE ORGANIQUE OU NON, CAPABLE DE DONNER DANS CERTAINES CONDITIONS, UNE ADHÉRENCE PLUS OU MOINS INTENSE AVEC LES SUPPORTS SUR LESQUELS IL A ÉTÉ APPLIQUÉ.
ADHÉRENCE:	ENSEMBLE DES FORCES QUI S'EXERCENT ENTRE DEUX SURFACES EN CONTACT ÉTROIT.
ADHÉSION:	PHÉNOMÈNE PHYSICO-CHIMIQUE PRODUISANT L'ADHÉRENCE.
SUPPORT (SUBSTRAT, ADHÉREND):	MATÉRIAU SUR LEQUEL EST APPLIQUÉE LA COLLE
MATURATION (MÛRISSEMENT, CURING):	TRANSFORMATION DES CARACTÉRISTIQUES DU MÉLANGE EN FONCTION DU TEMPS ET ÉVENTUELLEMENT D'AUTRES FACTEURS (TEMPÉRATURE) AU COURS D'UNE PÉRIODE DE REPOS QUI PERMET À L'ADHÉSIF D'ACQUÉRIR SES CARACTÉRISTIQUES D'UTILISATION.
RUPTURE ADHÉSIVE:	RUPTURE D'UN ASEMBLAGE COLLÉ SURVENANT À L'INTERFACE ENTRE LE SUPPORT ET L'ADHÉSIF.
RUPTURE COHÉSIVE:	RUPTURE SURVENANT AU COEUR DE L'ADHÉSIF. LA FORCE COHÉSIVE DE L'ADHÉSIF EST DONC ATTEINTE.
THERMODURCISSABLE:	SE DIT D'UN ADHÉSIF DONT LA RÉTICULATION EST ATTEINTE GÉNÉRALEMENT PAR CHAUFFAGE.
THERMOPLASTIQUE:	SE DIT D'UN CORPS SUSCEPTIBLE, EN PRINCIPE, D'ÊTRE RAMOLLI D'UNE FAÇON RÉPÉTÉE PAR ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE ET DURCI PAR ABAISSEMENT DE LA TEMPÉRATURE.
COLLE STRUCTURALE:	COLLE POUVANT TRANSMETTRE UNE CHARGE "SIGNIFICATIVE".

PRÉPARATION DE SURFACE POUR ADHÉSION OPTIMALE DES COLLES ÉPOXY

par

M.A. Pierre-Louis

H.B. Fuller Canada Inc.
88 boul. Industriel
Boucherville (Québec)
J4B 2X2

Le Collage Structural des Métaux
CNRC/IGM, 29 mars 1988, Boucherville (Québec)

PREPARATION DE SURFACE POUR ADHESION OPTIMALE DES COLLES EPOXY

1- Introduction

Le monde du collage, qui a subi plusieurs révolutions depuis l'utilisation des produits de la nature datant d'avant Jésus Christ jusqu'à l'apparition des résines synthétiques, est dynamique, en évolution et en progrès incessant. Un des progrès spectaculaires en ce domaine fut la découverte des résines époxy en 1947. (voir figures 1 et 2) Cet adhésif structural, autrefois presque limité aux applications aéronautiques et aérospatiales, est maintenant à usage quotidien dans les industries de l'automobile, des appareils ménagers, du meuble, de la construction et de la récréation etc... Ceci est principalement dû à la versatilité, à la vitesse, à l'intégrité économique et structurale du collage à l'époxy.(voir tableaux 1 et 2) Dans l'industrie aéronautique par exemple, plusieurs raisons telles que: l'économie sur le poids, la performance améliorée de la fatigue, justifient le collage à l'adhésif structural (époxy) plutôt que d'autres méthodes conventionnelles d'assemblages comme le rivet, le soudage etc.

Si l'utilisation d'adhésifs dans les applications structurales a augmenté considérablement pendant les 25 dernières années...ceci est non seulement dû aux améliorations faites dans les formulations d'adhésifs mais aussi aux améliorations faites dans la préparation de surfaces et dans le "design du joint".

Notre but ici est de décrire les différentes méthodes de préparation de surfaces des métaux car nous reconnaissons que les surfaces propres, sèches et fermes, sont nécessaires à la production d'une adhérence performante et durable mais avant de faire celà, laissons-nous définir brièvement quelques termes fondamentaux rencontrés dans les joints collés et les théories d'adhésion.

2- Termes fondamentaux -

2.1- Les contraintes: Il y a quatre types de contraintes qui sont rencontrés dans le collage structural: le cisaillement (shear), la traction (tensile), le clivage (cleavage), le pelage (peel). (voir fig.3)

.....

- Cisaillement (shear): La force est appliquée parallèlement au plan du joint collé et est distribuée sur toute la surface du joint.
- Traction (Tensile): La force est appliquée perpendiculairement au plan du joint collé et est distribuée sur toute la surface du joint.
- Clivage (Cleavage): Une force est introduite à un bout du spécimen collé pour séparer la liaison. Cette force est concentrée à la lisière de la liaison.
- Pelage (Peel): Le pelage s'applique aux substrats flexibles. La contrainte est confinée à une mince ligne à la lisière de la liaison.

2.2- Théories d'adhésion -

Le fait qu'il n'existe pas une théorie universelle d'adhésion même dans notre monde moderne de haute technologie signifie que la science de l'adhésion reste un sujet controversé et extrêmement complexe. Le terme d'adhésion a deux significations: pour le chimiste-physicien, elle représente les forces intermoléculaires qui agissent sur une interface alors que sa signification technologique la relie à la force mécanique qui est demandée pour séparer deux matériaux.

Sans entrer dans les détails, signalons que quatre théories principales d'adhésion ont été proposées. Selon la théorie mécanique: l'adhésif entre dans les irrégularités ou pores du substrat ou de l'adhérent. Il s'agit dans cette théorie d'une pénétration mutuelle de deux matériaux présentant une texture adaptée. Les matériaux "composites" organiques ou non sont basés sur ce principe. Avec la théorie d'adsorption les macromolécules d'adhésifs sont adsorbés sur le substrat et gardés là par diverses forces d'attraction. Avec la théorie de diffusion, les macromolécules d'adhésifs diffusent dans le substrat, éliminant ainsi l'interface. Exemple l'autohésion des caoutchoucs. Selon la théorie électrostatique les matériaux constituant un joint adhésif sont tenus ensembles par des forces électrostatiques.

2.3- Critères de base pour avoir une bonne adhésion:

a) un bon contact entre la phase de mouillage et le substrat. En d'autres termes, il faudrait que la colle présente une tension critique(yc) inférieure à l'énergie superficielle du produit à coller, permettant d'obtenir un angle

.....

de mouillage nul. Cette énergie superficielle critique de l'adhéré peut être très variable suivant un traitement de surface, le plus souvent traitement d'oxydation superficielle. (voir figure 4)
b) Absence de couches superficielles de faible résistance (weak boundary layers). Bikerman qui a étudié les diverses sources de ces couches superficielles de faible résistance en a dénommé 7 classes.

Les couches superficielles potentielles de faible résistance incluent: la poussière, la graisse et oxydes métalliques relativement de force faible.
c) Absence de concentrations de "stress" qui pourraient conduire à la rupture.

3- Pré-traitements

D'une façon générale ce qu'on présente comme surface métallique est généralement une surface d'oxydes métalliques avec des couches d'eau, des matières organiques et des gaz adsorbés. (voir figure 5) Ainsi le matériel adhésif dans le joint n'est pas réellement dans une aucune liaison vraiment métallique. La couche couvrant la surface du métal élimine les forces d'attraction et les effets interfaciaux ordinairement associés aux sous-couches métalliques c-a-d les atomes du métal. Pour toutes ces raisons, il faut pré-traiter les surfaces avant d'appliquer l'adhésif. Dépendant de la nature du substrat le traitement pourrait être simple ou complexe. Le tableau (3) résume les différents types de traitement qu'on rencontre dans les industries et leurs effets sur une surface donnée.

3.1-"Les Primers" : Les primers sont des composants ou résines qui peuvent être appliqués aux substrats pour renforcer la performance initiale et/ou à long terme d'un joint. Les raisons pour lesquelles on utilise les "primers" avant de coller les métaux sont complexes. On peut les résumer comme suit: (voir figure 6)
a) Le revêtement immédiat d'une surface fraîchement préparée avec une solution de polymère la protège du dommage mécanique ou de la contamination. Une surface de haute énergie qui est facilement contaminée est convertie à une surface qui a une énergie de surface plus faible mais compatible avec l'adhésif utilisé.

.....

b) En appliquant le solvant adhésif, les irrégularités de la surface peuvent être remplies, ceci ne serait possible avec les adhésifs structuraux hautement visqueux normalement utilisés pour coller les métaux.
c) Certains primers sont chimisorbés à l'oxyde de métal et par conséquent ne peuvent être déplacés volontiers par l'humidité. Ceci pourrait conduire à des joints plus durables. La durabilité des joints au métal peuvent être améliorée par l'incorporation dans le "primer" des agents inhibiteurs à la corrosion tel que: le chromate de strontium.

Une surface d'aluminium qui a été fraîchement décapée ou anodisée est hautement réactive et subira une interaction avec l'eau ou des contaminants organiques présents dans son environnement. Donc pour obtenir une interaction maximum avec l'adhésif, le collage doit être accompli à quelques heures du traitement ou bien la surface doit être revêtue d'une couche d'apprêt c-a-d de primers.

4- Description des méthodes de préparation de surfaces-

Les méthodes usuelles de préparation de surface peuvent être classées en méthodes physiques et chimiques. Souvent une combinaison de ces 2 méthodes est utilisée.

4.1- Méthodes physiques -

Le ponçage (abrasive paper), le machinage (machining), le brossage métallique, le "shot blasting" sont des méthodes communes de préparation de surfaces, spécialement les métaux. Le "blast cleaning", procédé par lequel la surface métallique est bombardée par des particules petites, dures et ordinairement pointues, est la méthode préférée parce qu'elle permet de se rendre rapidement à la vraie surface du métal (bare metal). Cependant elle demande beaucoup de travail de nettoyage; elle est impraticable quand il s'agit de minces sections de métal facilement dommageables.

4.2- Méthodes chimiques -

Les méthodes chimiques de préparation de surface peuvent être du type d'action de solvant (solvent action) ou du type de conversion de surface (surface conversion). Dans la plupart d'usines les 2 types sont utilisés.

a) Action du solvant (solvent action) -

Les méthodes d'action de solvant exposent la surface du métal à l'action dissolvante des solutions chaudes de détergent ou des solvants organiques.

.....

Ces traitements déplacent la poussière et la graisse. Les solutions chaudes de détergent sont souvent appliquées par "spray" de sorte que la pression puisse contribuer à l'enlèvement de la matière à la surface. L'immersion de la pièce à nettoyer dans une solution tourbillonnante est aussi possible. L'une ou l'autre technique demande un rincage et un séchage subséquent avant de faire le collage. Les solvants organiques dissolvant la graisse tels que: l'essence minérale ou 1,1,1, trichloroéthane sont largement utilisés pour enlever aux surfaces de l'huile ou de la graisse. Dans ce cas on utilise la technique qui s'appelle le dégraissage à la vapeur. Le dégraissage à la vapeur permet aux vapeurs chaudes de solvant de se condenser sous forme de gouttelettes sur la pièce à nettoyer. Le solvant condensé se glisse sur la surface et dissout l'huile et la graisse avant qu'il tombe dans le réservoir chauffant. Ensuite le solvant est re-vaporisé et ré-utilisé alors que l'huile et la graisse à cause de leur point d'ébullition plus élevé restent dans le réservoir. Pour les pièces complexes où le dégraissage à la vapeur est impraticable, les méthodes de "solvent wiping" sont souvent utilisées. Cependant il est important de remplacer les chiffons avant qu'ils deviennent contaminés.

Les méthodes de nettoyage au détergent et de dégraissage au solvant fonctionnent bien quant on prête attention au maintien de température et de pressions, aux filtres et aux concentrations de solutions. Comme il existe dans n'importe quelle technique d'immersion, la contamination soudaine ou graduelle de la solution est toujours une possibilité et on doit en tenir compte.

b) Conversion de surface -

Comme nous avons mentionné précédemment les surfaces sont rarement pures. Elles sont généralement une combinaison d'oxydes, de sulfures, de chlorures, des sels d'acides, de l'humidité absorbée, de l'huile et des gaz atmosphériques. Ces substances sont formées de diverses façons pendant les opérations de "rolling" à haute température, de "casting" ou de "drawing". La structure de la surface résultante est rarement ferme et fortement collée au métal. A cause de celà, elle est portée à craquer ou à former des écailles. Les métaux sont fréquemment assujettis à certaine sorte de conversion de surface avant le collage. Ces procédés généralement déplacent

.....

les matériaux complexes qui se trouvent à la surface du métal et les remplacent par une structure plus uniforme et plus ferme.
Les méthodes typiques de "conversion de surface" comprennent le "pickling", 'l'etching", 'l'anodizing", pour les métaux et l'oxydation à la surface pour les "plastiques".

Le "pickling" est le traitement d'un métal avec un acide pour dissoudre les matériaux à la surface. Le métal ainsi nettoyé, commence ordinairement à oxyder dans l'air, mais le nouveau film d'oxyde a une meilleure base pour le collage que les mélanges de matériaux avant la conversion. On peut employer pour le "pickling" un système d'immersion ou de "spray". Les acides muriatiques et nitriques sont souvent utilisés,, donc les précautions usuelles doivent être observées avec ces solutions corrosives. Les solutions du "pickling" doivent être vérifiées régulièrement pour la force et la température si on veut obtenir de bons résultats. Il ne faut surtout pas oublier que le rinçage et le séchage sont aussi des parties intégrantes de"l'opération pickling".

"L'etching" est similaire au " pickling", mais est un procédé plus sévère. Une quantité considérable du métal de base peut être enlevée mais le résultat général est le même c-a-d formation d'une surface suffisamment en bon état (sound surface) pour permettre une bonne adhésion. Une solution d'acide sulfurique (sulfuric acid etch) est largement utilisée pour les liaisons de qualité sur l'aluminium. D'autres acides peuvent être employés, mais avec différents métaux. D'une façon générale les traitements les plus communs sont à base de phosphate pour l'acier, de zinc ou chrome pour les métaux non-ferreux.Encore les solutions 'd'etching" sont corrosives et les précautions d'usages doivent être observées.

"Anodizing" peut être employé comme une technique de préparation de surface pour l'aluminium. Dans ce procédé, la pièce constitue l'anode d'une cellule électrolytique et un film d'oxyde d'aluminium est déposé sur la surface. Ce film est quelque peu poreux et tout à fait ferme si le procédé est proprement contrôlé et une surface idéale pour le collage en résulte.
Se trouvent aussi en Annexe des tableaux et des figures qui montrent des résultats à cours et à long terme, des traitements de surface sur l'aluminium, l'acier inoxydable et de différents alliages de titane.

CONCLUSION

Les métaux les plus fréquemment rencontrés dans le monde du collage sont l'aluminium et l'acier. Il faut aussi noter que le collage est important avec d'autres métaux, incluant le titane dans les applications aérospatiales et le cuivre dans les circuits imprimés. En guise de conclusion nous décrivons une méthode de préparation de surface pour chacun des métaux mentionnés.

ALUMINIUM: Méthode: acide sulfurique - dichromate

1- Dégraisser avec solvant et sécher.

2- Immerger le métal pour 10-20 minutes à 150°F dans une solution d'acide chromique préparée de la façon suivante:

Dissoudre le dichromate de sodium ($Na_2Cr_2O_7 . 2H_2O$)	8% par poids
Eau distillée	65% " "
Ajouter lentement en agitant l'acide sulfurique (sp.gr.= 1.84)	27% " "

3- Rincer le métal avec de l'eau.

ACIER: Méthode: Acide chlorhydrique.

1- Dégraisser avec solvant.

2- Immerger le métal pendant 5-10 minutes à la température de la pièce dans une solution de composition suivante:

- Acide chlorhydrique concentré	50 parties par poids
- Eau distillée	50 " " "

3- Laver à l'eau distillée et sécher dans un four à ventilation.

4- Mettre une couche d'apprêt et coller immédiatement.

ACIER INOXYDABLE: types 301 et 302

1- Dégraisser.

2- Tremper dans une solution 25% en acide sulfurique pendant 10-15 minutes à 130°F.

3- Tremper pendant 5 minutes à 160°F utilisant une solution de:

- Acide sulfurique concentré	25% par poids
- Dichromate de sodium	2.5% " "
- Eau	72.5% " "

.....

4- Rincer avec de l'eau du robinet.

5- Sécher à 150°F pendant 10-20 minutes.

CUIVRE:

1- Dégraisser avec solvant et sécher.

2- Immerger le métal pour 1-2 minutes à la température de la pièce dans une solution préparée comme suit:

- Chrome ferrique (solution 42%)	6% par poids
- Acide nitrique concentré	72% " "
- Eau	82% " "

3- Rincer le métal avec de l'eau distillée et sécher à la température de la pièce.

4- Puisque les oxydes se forment rapidement à la surface, elle doit être revêtue d'adhésif immédiatement.

TITANE:

1- Dégraisser.

2- Immerger pendant 10 minutes à 140-150°F dans une solution de:

- Acide chlorhydrique(sp.gr.=1.19)	48.0% par poids
- Peroxyde d'hydrogène (solution 30%)	2.0% " "
- Formaline(solution 40%)	10.0% " "
- Eau	40.0% " "

3- Rincer à l'eau distillée ou déionisée.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

"OUVRAGES GENERAUX"

1- Les colles et adhésifs et leurs emplois industriels - vol. I
Guy Le Prat, Paris (1974)

2- Les colles et adhésifs et leurs emplois industriels. - vol.II
Guy Le Prat, Paris (1977)

3- Industrial Adhesion problems. - D.M.Brewis, D.Briggs, Orbital Press (1985)

4- Adhesion and Bonding - Norbert M.Bikales, John Wiley and Sons Inc. (1971)

5- The Epoxy Resin Formulators Training Manual - The Society of the Plastics Industry, Inc. (1984)

6- The Society of the Plastics Industry, Inc. - Adhesion: Technology, Performance and Trends (1983)

7- Handbook of Adhesive bonding - New York McGraw Hill (1973)

8- American Society of Metals -(1964)

9- Adhesive for Industry - Technology Conferences (1980)

10- Surface preparation for Best Resiweld Adhesion -
H.B.Fuller Canada Inc.

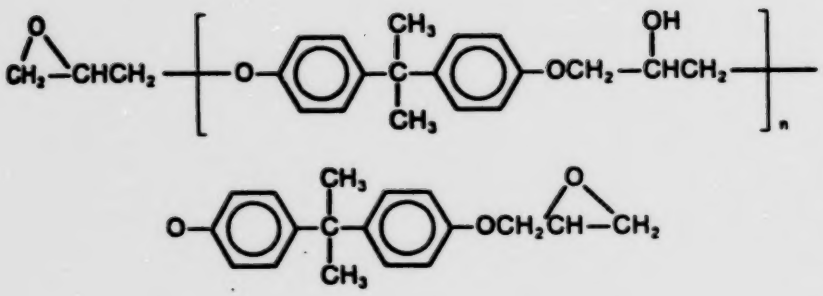


Figure 1: résine époxy
(diglycidyl éther de bisphénol A)

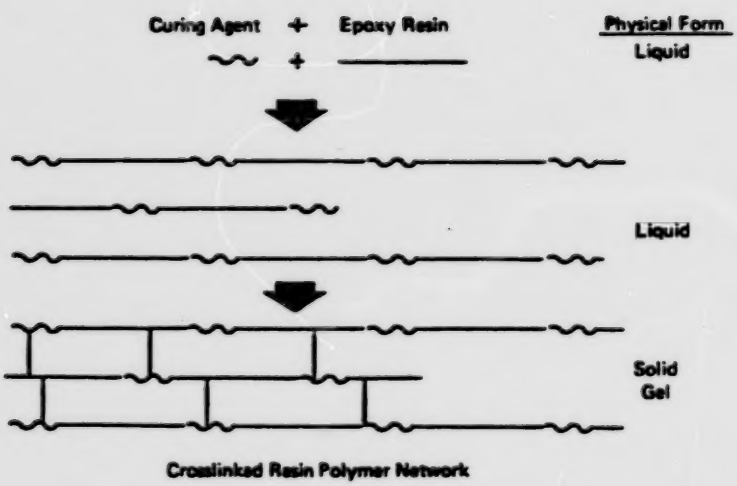


Figure 2:: diagramme de cure d'une résine époxy.

Ranking of Structural Adhesives

Property	Ranking			
	1	2	3	4
Durability	Epoxies	Acrylics	PU	Cyanoacrylates
Curing speed	Cyanoacrylates	Acrylics	PU	Epoxies
Thermal resistance	Epoxies	PU	Acrylics	Cyanoacrylates
Low temperature resistance	PU	Epoxies	Acrylics	Cyanoacrylates

Tableau 1: comparaison des adhésifs structuraux.

Comparison of General Characteristics of Adhesives

Adhesive type	Toughened acrylic	Two-part tough epoxy	Poly-urethane	Toughened single-part epoxy
Toxicity	low	low	high	low
Capital cost of equipment (if necessary	low	high	high	low-medium
Process complexity if equipment used	low	medium	high	low
How cured	cold	hot or cold	cold-warm	hot
Ventilation	yes	yes	yes	yes
Shortest cure time practical (minutes)	0.3	10	2	1
Shear strength	high	medium-high	medium	very high
Peel strength	high	medium	medium	high
Impact strength	very high	medium	medium	extremely high
Gap fill	good	good	good	good
Environmental resistance	very good	good	medium	excellent
Performance GRP	excellent	good	medium	excellent

Tableau 2: comparaison des caractéristiques générales des adhésifs structuraux.

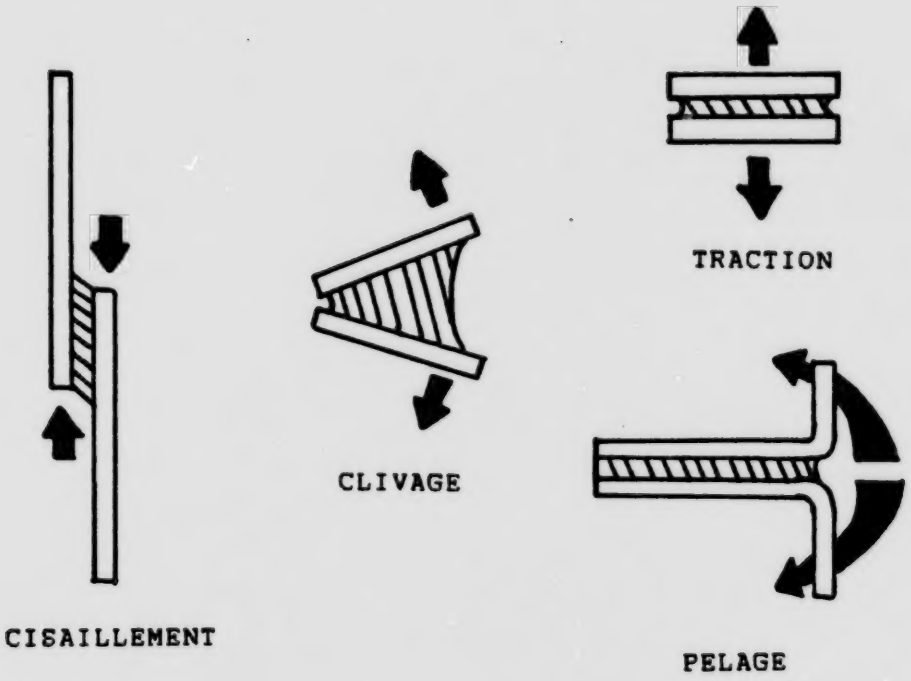


Figure 3 : schéma des types de contraintes rencontrées dans le collage structural.

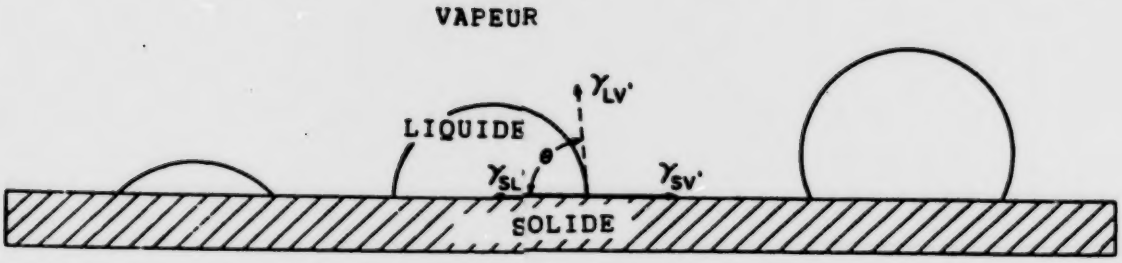


Figure 4: mouillage et angle de contact.

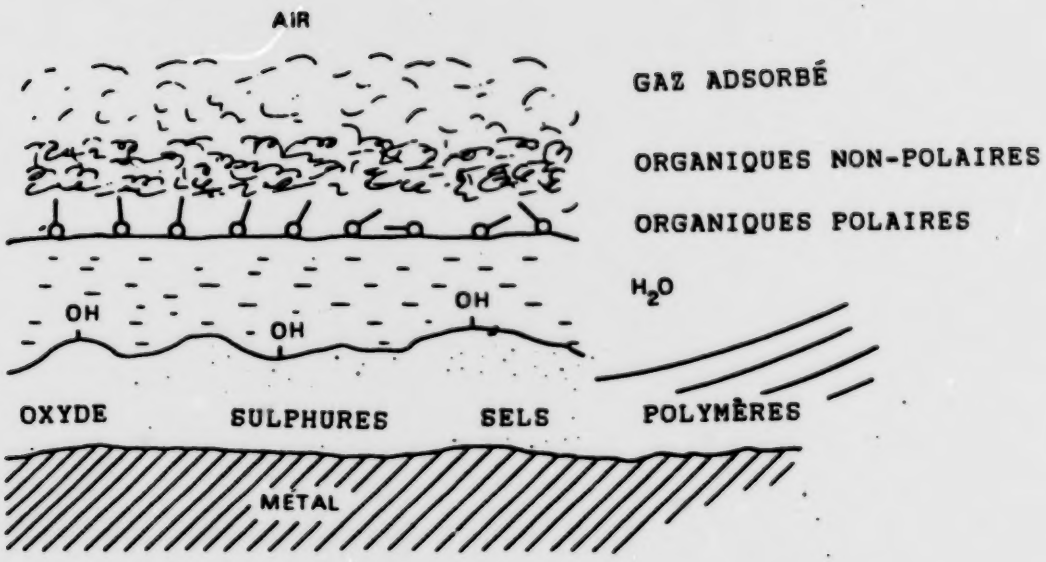


Figure 5: couches superficielles adsorbées sur une surface de métal.

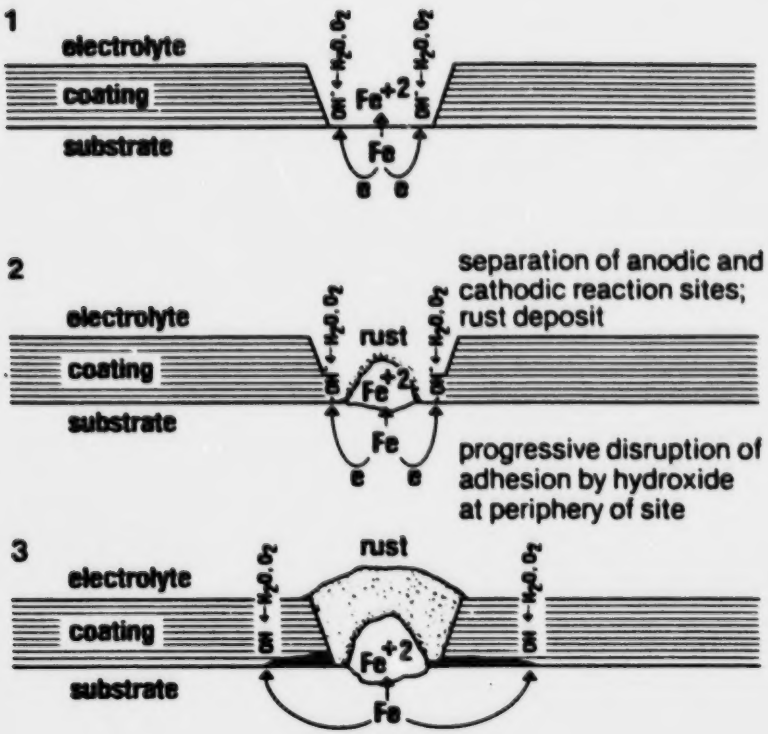


Figure 6: schéma général du mécanisme de corrosion de l'acier protégé par un revêtement époxy.

Effects of Surface Pretreatments

Treatment	Possible effects on surface
Mechanical e.g. grit blasting	(a) Remove potential weak boundary layers (especially metals). (b) Increase surface roughness (all materials).
Solvent (liquid or vapour)	(a) Remove potential weak boundary layers (plastics, metals or ceramics). (b) Weaken surface by plasticisation or by forming a porous surface layer (plastics). (c) Increase surface roughness (plastics).
Chemical	(a) Remove potential weak boundary layers (plastics or metals). (b) Increase surface roughness (plastics or metals). (c) Alter surface chemistry with consequent changes in the rate and degree of wetting (plastics or metals). (d) Produce a more stable oxide (metals).

Tableau 3: effets des différents types de traitements de surface.

ANNEXE

	Exposure conditions							
	Industrial atmosphere lap shear strength [psi (MPa)]				Seacoast atmosphere lap shear strength [psi (MPa)]			
	Initial	2 yr	4 yr	8 yr	Initial	2 yr	4 yr	8 yr
Vapor degreasing	1,970 (13.5733)	1,530 (10.5417)	1,264 (8.7089)	907 (6.2492)	1,970 (13.5733)	0	0	0
Grit blasting and vapor degreasing	2,030 (13.9876)	2,060 (14.1934)	2,030 (13.9867)	1,930 (13.2977)	2,030 (13.9867)	1,800 (12.4020)	1,580 (10.8862)	1,350 (9.3015)
Chromate conversion coating	1,260 (8.6814)	1,230 (8.4747)	1,198 (8.2542)	1,130 (7.7857)	1,260 (8.6814)	835 (5.7532)	430 (2.9627)	0
Anodized[a]	2,530 (17.4317)	2,130 (14.6757)	1,868 (12.8705)	b	2,530 (17.4317)	1,660 (11.4374)	1,690 (11.6441)	b
Chromic-sulfuric acid	2,830 (19.4987)	2,900 (19.9810)	2,731 (18.8166)	2,370 (16.3293)	2,830 (19.4987)	0	0	0
Phosphoric acid-alcohol etch	2,660 (18.3274)	2,470 (17.0183)	2,450 (16.8805)	2,130 (14.6757)	2,660 (18.3274)	0	0	0
Acid paste	2,500 (17.2250)	2,300 (15,8470)	2,099 (14.4621)	2,030 (13.9867)	2,500 (17.2250)	0	0	0

[a]Anodized in 15% by weight sulfuric acid at 21.1°C (70°F) and 12 amps/ft^2 and sealed for 20 min in boiling, deionized water (0.85 mil coating).
[b]Joints still under test after 7 yr of exposure.

Tableau A-1: efficacité relative des différents traitements de surfaces sur l'aluminium 6061-T6 collé par un système d'époxy à 2 composants durci à la température ambiante.

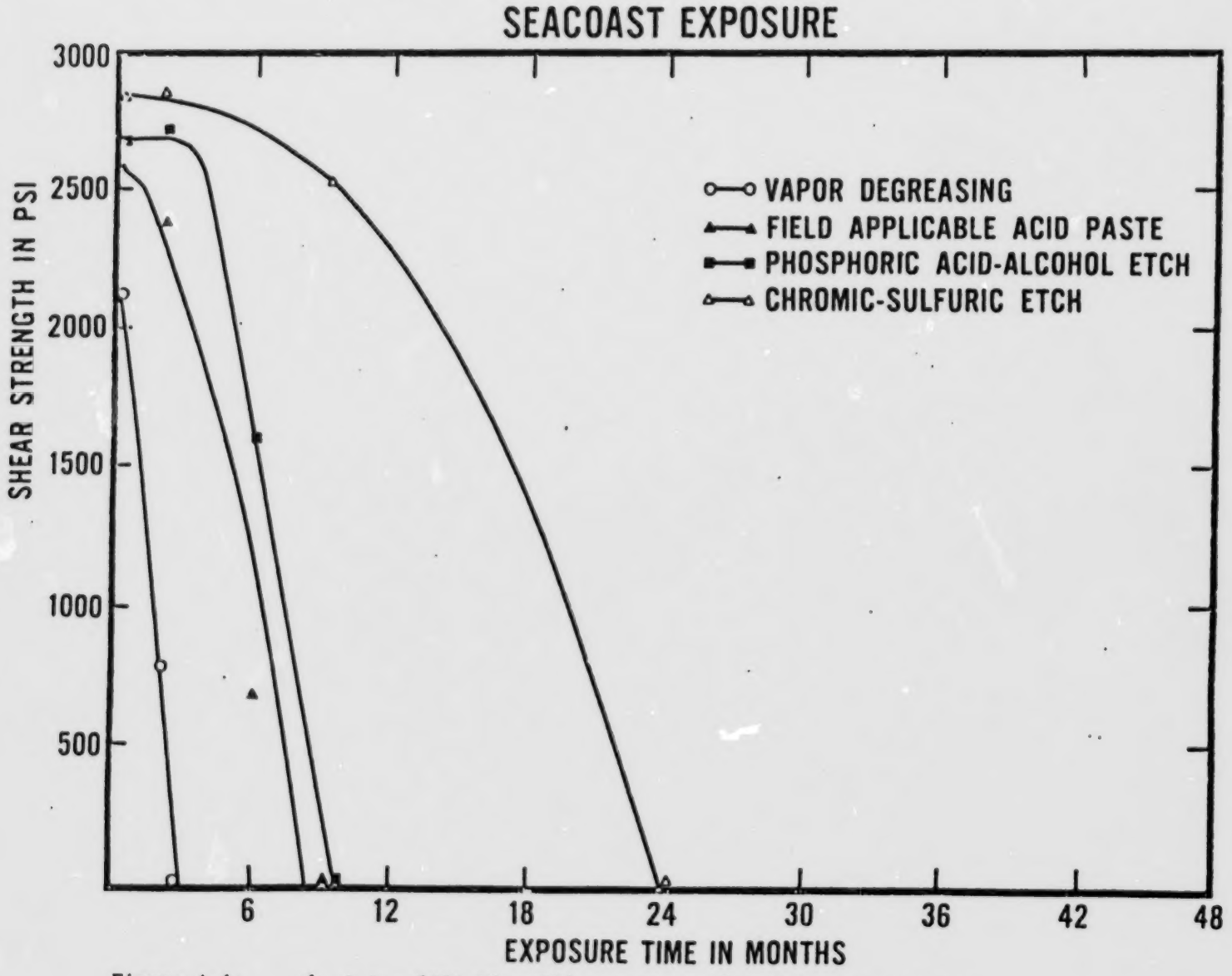
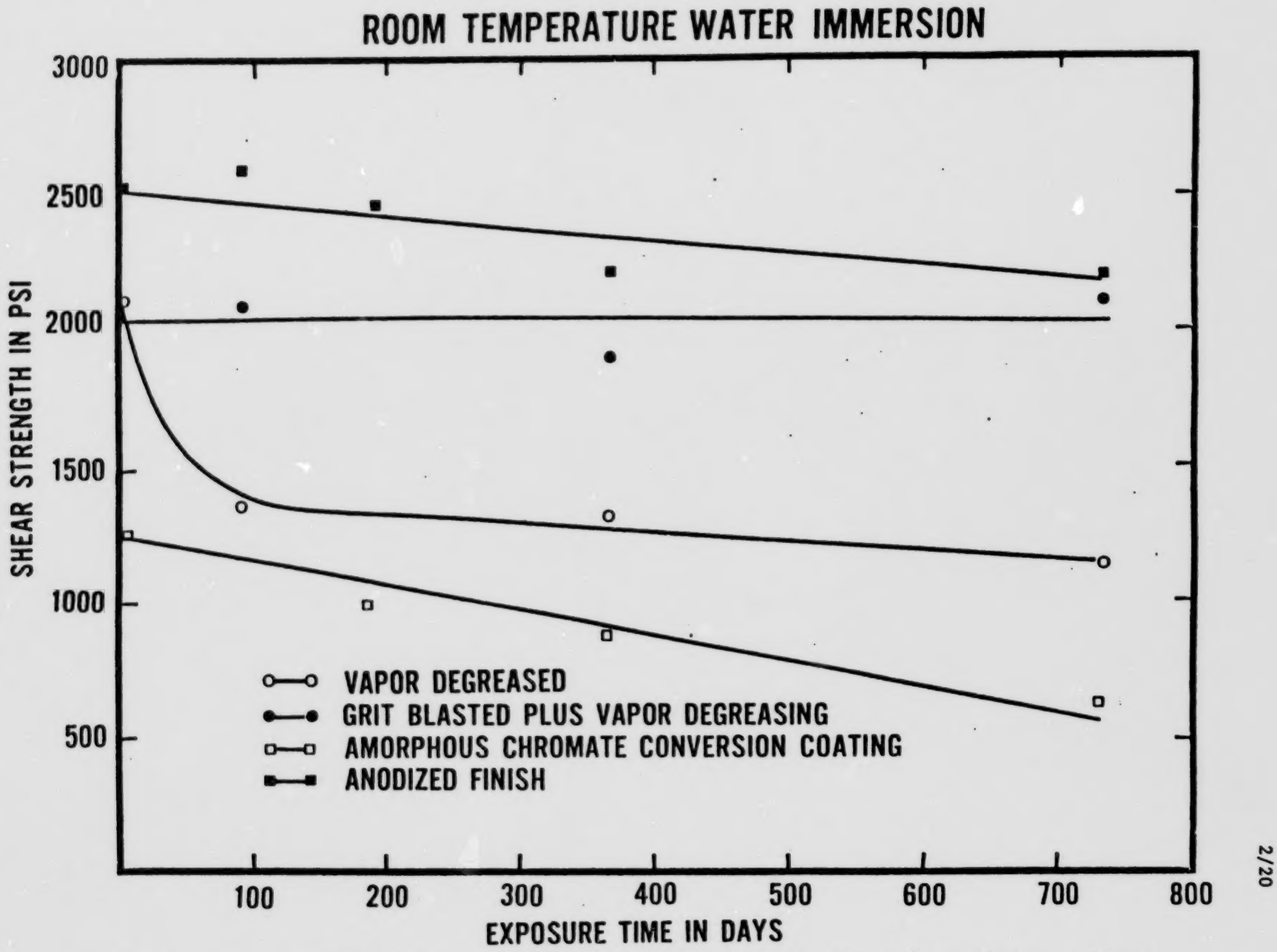


Figure A-1: aluminium 6061-T6 collé par un système d'époxy-polyamide.



2/20

Figure A-2: aluminium 6061-T6 collé par un système d'époxy-polyamide durci à la température ambiante.

Effect of Pretreatments for Steel and Aluminium on Water Resistance of Joints Bonded with AV 1566 GB[30]

Material	Pretreatment	Initial strength (MPa)		Strength after immersion (MPa)	
		23 °C	80 °C	23 °C	80 °C
Stainless steel EN 58B	Degrease	23.9	25.6	15.7	17.7
	Grit blast	25.6	32.0	14.1	16.7
	Etch	27.4	35.1	27.2	29.7
Stainless steel EN 58J	Degrease	27.8	31.9	16.7	17.0
	Grit blast	27.3	34.0	29.0	25.0
	Etch	27.8	39.9	30.1	33.6
Mild steel EN 3B	Degrease	20.4	24.3	9.8	7.3
	Grit blast	23.7	27.4	15.9	18.3
Alclad aluminium BS 3L73	Degrease	19.4	23.3	2.3	2.3
	Grit blast	20.9	26.6	10.0	9.4
	Etch	29.4	37.2	26.1	29.2

Notes

(a) The strengths quoted were for lap joints
(b) The adhesive is a product of Ciba Geigy Ltd.
(c) The temperatures refer to the testing conditions
(d) The joints were immersed in water at 40 °C for 30 days

Tableau A-2: effets de pré-traitements sur l'acier/aluminium immergé dans l'eau à 40°C.

SURFACE PREPARATION AND DURABILITY OF ALUMINIUM BONDED JOINTS

by

Jan K. Spelt

Alcan International Ltd
Kingston Research & Development Centre
P.O. Box 8400
Kingston (Ontario)
K7L 4Z4

Structural Adhesive Bonding of Metals
NRCC/IMRI, March 29 1988, Boucherville (Quebec)

OUTLINE

1. History of aluminum bonding
2. Pretreatments
3. Joint durability
4. Alcan applications

HISTORY OF ALUMINUM BONDING

- Fokker and de Havilland began in the late 1930's
- Adhesives used to laminate sheet metal, bond stringers (stiffeners) and create sandwich panels (honeycomb, balsa wood)
- Adhesives improve stiffness, stability, fatigue, fracture
- Not all experience favourable: e.g. durability of honeycomb in aircraft

PRETREATMENTS

Pretreatments create an aluminum oxide with some or all of these properties:

- uniform
- strong, well-adhering
- stable in water
- wettable (clean)
- good microtopography

TYPES OF AL PRETREATMENT

. Degrease
. Abrade
. Acid etch
. Conversion coat
. Anodize
. Primers

Degrease

- vapour degrease (trichloroethylene) far better than solvent wipe
- only improves wettability
- poor durability

Abrade

- grit blast, sand
- exposes clean metal, roughness
- poor durability

Acid Etch

- sulfuric acid/sodium dichromate (FPL) etch (ASTM D2651, D2674)
- used with degreasing to give good durability

Step:
1. Degrease
2. 10 min etch at 68°C
3. Water rinse (cold, tap water)
4. Air dry, preferably at 66°C

- problem with Cr
- sensitive to process conditions
  e.g. temperature, composition of rinse water; age/composition of acid bath; delays before rinsing

Conversion Coat

- acid etch and conversion coat e.g. Alodine 1200 (Amchem)
- contains Cr
- good durability
- brush, spray, dip

Anodize

- phosphoric acid anodize (PAA), chromic acid anodize (CAA)
- aerospace batch processes; used with acid etching; total time >1 hour
- stable oxide; microporous
- oxides are fragile; require primer

Primers

- usually used with etching or anodizing
- assist wetting
- may improve durability
- some contain "coupling agents" e.g. silanes chemisorb on metal oxide and react with adhesive

ADHESIVE/PRETREATMENT COMPATIBILITY

- Adhesive and pretreatment must be tested for compatibility

- substrate/pretreatment/adhesive form a system

DURABILITY OF BONDED AL JOINTS

. Consider environmental and mechanical joint conditions:

Environment	- water
	- salt only for 2XXX and 7XXX alloys
	- temperature
Mechanical	- constant load
	- cyclic load

. Empirical predictions of life i.e. use accelerated tests; compare with "proven" systems (e.g. aerospace)

ACCELERATED DURABILITY TESTS

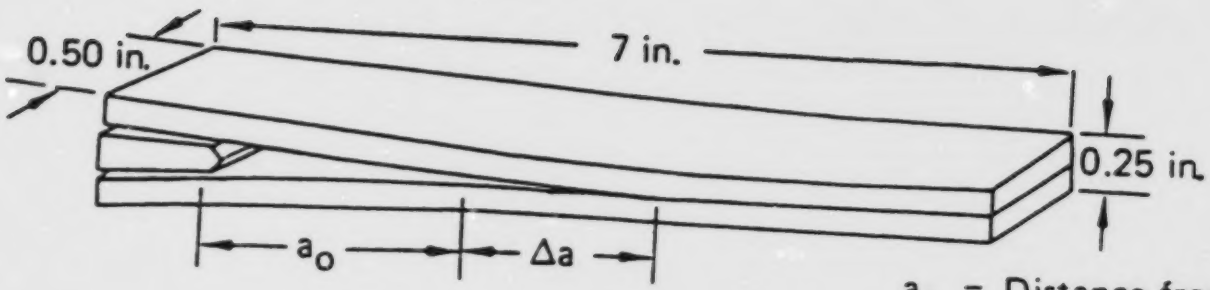
- Stressed lap shear in humidity cabinet:
  - measure time-to-failure and loss of strength
- Crack growth tests:
  - Boeing wedge; identifies poor pretreatment; stiff adhesives only
  - loaded double cantilever beam (DCB) or compact tension (CT); more quantitative
- Lap shear water soak; quick screening test

ALCAN APPLICATIONS OF STRUCTURAL ADHESIVE BONDING

. Cars with weld-bonded and/or riv-bonded stamped aluminum frames:

  - bonding increases stiffness
  - integral joint sealing
  - 1/3 spot welds or fasteners
  - weight reduction
  - eliminate E-coat

. Develop bonding systems for auto plants



a_o = Distance from load point to initial crack tip

Δa = Growth during exposure

LES ADHÉSIFS CYANOACRYLATES ET ANAÉROBIQUES: LES COLLES D'ASSEMBLAGE MODERNES

par

Ruben Burga

Loctite Canada Inc.
270 Britannia Rd.
Mississauga (Ontario)
L4Z 1LS6

Le Collage Structural des Métaux
CNRC/IGM, 29 mars 1988, Boucherville (Québec)

INTRODUCTION

Les adhésifs cyanoacrylates et anaérobiques sont employés dans le marché industriel depuis vingt-cinq ans. Ils durcissent par un mécanisme de réaction interne qui fournit alors une polymérisation sans solvant; un facteur important pour les ouvriers lors de l'assemblage des pièces métalliques. Ces mécanismes uniques de durcissement ont ouvert la porte aux opportunités pour le collage de plusieurs matériaux et, en particulier, le collage du métal dans les industries de fabrication automobile et dans le collage de renforts sur le métal en feuille. Cette présentation portera sur la facilité d'emploi des colles cyanoacrylates et leurs possibilités comme colles d'outillage pour le collage temporaire du métal. La présentation portera également sur le mode d'emploi des colles anaérobiques et leur utilisation comme adhésif de machinerie ainsi qu'adhésif durable de fabrication industrielle.

DESCRIPTIONS GÉNÉRALES

Les adhésifs cyanoacrylates et anaérobiques sont des colles avec un composant du type polyacrylate, ce qui veut dire que leur mécanisme de durcissement est unique du fait qu'il se transforme tout seul d'un liquide à un polymère solide. Cette polymérisation qui se produit entre deux surfaces mène au collage de pièces sans solvant ou diluant et sans les dangers toxiques associés aux solvants.

Il y a plusieurs théories sur l'adhésion: la réaction permettant à deux pièces d'être collées avec une troisième matière. Les deux théories principales sont connues comme la théorie de "l'absorption" et la théorie "rhéologique". Une explication détaillée de ces théories n'est pas nécessaire et n'est pas le but de cette présentation. Il suffit d'expliquer que dans la théorie d'absorption, il faut prendre en considération les forces de Van der Waal (forces attractives) entre les molécules de l'adhésif liquide et les molécules de la surface à coller ce qui donne une adhésion intime pendant que la colle durcit. Cette théorie est utile pour expliquer le collage du métal

parce qu'il y a peu de chance que l'adhésif attaque chimiquement la surface des métaux pour former un soudage. Quand il s'agit du plastique et son collage, la théorie rhéologique donne une meilleure explication. Les couches frontières d'un plastique sont surmontées par la couche d'énergie plus haute d'un adhésif sous forme liquide. L'adhésif "mouille" alors le plastique et avec sa polymérisation laisse les propriétés de l'adhésif déterminer le fonctionnement de l'interface du collage et le fonctionnement des pièces collées en plastique.

LE MÉCANISME DE SÉCHAGE

Les cyanoacrylates

Les adhésifs cyanoacrylates sont généralement connus comme des colles instantanées: les "superglue". Ils contiennent des molécules aux forces cohésives qui, en présence d'un catalyseur particulier, durcissent pour prendre la forme de longues chaînes de polymères. Le collage des cyanoacrylates sur le métal s'explique plus facilement avec la théorie d'absorption et sur le plastique par la théorie rhéologique. Les cyanoacrylates sont connus dans l'industrie par leurs préfixes: éthyle, méthyle, allyle ou butyle. Les types qui sont communs dans le marché industriel (et particulièrement pour le collage des métaux) sont les éthyles et les méthyles.

Les méthyles de cyanoacrylate, parce qu'ils ont des molécules plus petites et cohésives que les éthyles, donnent un collage sur métal qui est initialement plus rapide et puissant. Mais dans les conditions sévères, les éthyles offrent un collage plus durable.

Les colles instantanées sèchent avec l'action catalytique de l'alcalinité superficielle qui se trouve dans l'humidité des conditions ambiantes et sur la plupart des surfaces dans ces conditions. Le nettoyage à l'alcool est souvent suffisant pour nettoyer et accélérer le séchage de la colle entre deux surfaces. Il est très important de noter que les pièces destinées au collage

doivent être propres pour s'assurer d'une polymérisation complète avec une bonne adhésion entre les surfaces. C'est ainsi que le fer, l'acier, l'acier allié, l'aluminium, le bronze et les autres métaux se collent plus facilement.

Quand la surface à coller est acide ou légèrement acide, le séchage du cyanoacrylate ralentit. Ces types de surfaces existent sur les tôles galvanisées, les pièces chromées et l'aluminium anodisé. Un accélérateur commun pour les colles cyanoacrylates se prête bien à l'amorçage du séchage sur ces surfaces imperméables. Cependant, il y a quelques fabricants de cyanoacrylates qui ont formulé des colles efficaces sur les surfaces imperméables. Ces colles instantanées durcissent rapidement dans les conditions ambiantes sèches ou bien sur les surfaces acides.

La durée et l'efficacité du collage sur le métal dépendent du design de l'assemblage des pièces. Il est recommandé de fabriquer les pièces pour l'assemblage collé où les forces de cisaillement sont maximales et les forces de choc et de clivage minimisées. La colle cyanoacrylate, une fois durcie, est un plastique rigide avec peu de résistance au choc mais qui doit sa haute résistance au cisaillement à sa structure moléculaire en forme de chaîne. Cela veut dire qu'avec les forces de tension ou cisaillement, la chaîne du polymère s'allonge sans se casser, mais avec les forces de choc ou clivage, une fissure minuscule peut se propager rapidement entre les chaînes et casser le collage (voir figure 1).

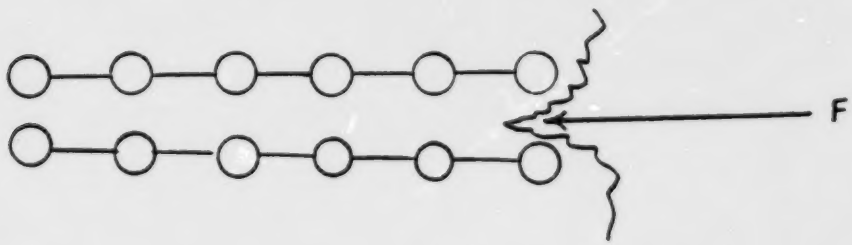


Figure 1 Propagation d'une fissure entre les chaînes moléculaires

Les plus récentes innovations par rapport à la formulation des cyanoacrylates ont donné un adhésif instantané renforcé qui, grâce à un agent de pontage à travers les chaînes de molécules, offre à la colle une puissante résistance au choc et clivage. En effet, l'adhésif cyanoacrylate renforcé possède des sites d'arrêt de fissures.

Le dernier point dans la sélection et l'utilisation des colles cyanoacrylates est la viscosité désirable de l'adhésif. Quand les pièces s'assemblent avec des interstices de moins de 0,08 mm, alors une colle avec une faible viscosité doit être choisie. Quand les interstices atteignent jusqu'à 0,5 mm d'épaisseur, les meilleurs résultats de collage sont obtenus avec les cyanoacrylates épais. Ces cyanoacrylates épais peuvent être formulés avec une viscosité sans écoulement approchant celle d'un gel.

Les adhésifs cyanoacrylates appartiennent à la famille des thermoplastiques, ce qui veut dire qu'ils s'écoulent lorsque la température des pièces approche 170°C (les colles instantanées s'utilisent dans les applications où la plage de température n'excède pas un maximum de 82°C et dans un certain cas 104°C). Leur usage dans les industries de métaux les destine alors non pas à l'application permanente sur des pièces structurales mais au collage temporaire du métal en remplaçant les pinces, crampons ou autres appareils de fixation avant de fixer les attaches mécaniques permamentes. Cependant, le collage du plastique ou du caoutchouc sur le métal donne d'excellents résultats de permanence parce que l'élément le moins fort de l'assemblage n'est plus la colle mais la pièce de plastique ou de caoutchouc.

Les conseils suivant donnent de bons résultats pour un collage efficace de deux pièces avec les colles cyanoacrylates.

1. Bien nettoyer toutes les surface de collage.

2. Dans l'assemblage des pièces, porter au maximum l'exposition aux forces de cisaillement et au minimum l'exposition aux forces du choc et clivage.

3. S'assurer que l'interstice entre les deux pièces à coller n'excède pas 0,5 mm. Pour de meilleurs résultats, l'interstice doit avoir moins de 0,08 mm d'épaisseur.

Les anaérobiques

Le nom anaérobique est souvent utilisé pour désigner les plastiques de polyester qui se durcissent ou se polymérisent en l'absence d'air sans la libération de solvant toxique. Les radicaux libres de l'anaérobique (en forme liquide) préfèrent se combiner avec les molécules de l'oxygène, ce qui donne un liquide en équilibre en présence de l'air ambiant. Mais en l'absence d'air, les radicaux libres ne pouvant pas se combiner avec l'oxygène se combinent avec les monomères dans le produit pour donner un mécanisme d'auto-durcissement. La continuation de cette réaction chimique provoque des liens entre les diverses molécules pour former, en effet, un seul polymère robuste de la famille des plastiques thermodurcissables.

La formulation des anaérobiques a été mise au point de telle sorte qu'il est maintenant possible d'en obtenir avec des propriétés souples ou rigides, de séchage rapide ou lent et avec une grande gamme de viscosité. Ce large choix des anaérobiques marié à leur toxicité minime et leur facilité d'application leur a permis de devenir un outil indispensable dans les industries de fabrication et d'entretien d'équipement.

Il est important de noter que seule l'absence d'air n'est pas suffisante pour un meilleur durcissement et un collage efficace. Les adhésifs anaérobiques donnent les meilleurs résultats sur les pièces de métal, et en particulier, les métaux actifs. L'activité superficielle des métaux, qui est déterminée par la présence des molécules libres de fer ou de cuivre, mène le durcissement des anaérobiques à former non seulement des liens mécaniques, mais aussi des liens chimiques avec la surface du métal. Les surfaces de métal inactives peuvent être activées avec un apprêt pour anaérobique (normalement obtenu du fabricant ou vendeur de l'adhésif). On retrouve plus bas une liste des surfaces de métal actives et inactives avec les anaérobiques:

Surfaces de métal actives		Surfaces de métal inactives	
Aluminium	Acier	Aluminium pur	Cadmium
Laiton	Nickel	Or	Argent
Bronze	Fer	Acier inoxydable	
Cuivre		Métal plaqué ou chromé	

Les adhésifs anaérobiques sont bien connus comme des adhésifs de blocage et fixation pour les applications dans le collage, le blocage et le scellage des pièces de machinerie, les attaches filetées, les pièces cylindriques et les raccords filetés. Tenant compte que ces adhésifs sont efficaces jusqu'à 150°C et 230°C dans certains cas, il est possible de remplacer plusieurs attaches mécaniques comme les rondelles d'arrêt, les écrous de blocage et même les montages fixés à pression.

La technologie anaérobique est aussi bien utile dans le collage structural des pièces de métaux. Les adhésifs structuraux anaérobiques ont deux limitations; les interstices ne doivent pas excéder 1 mm et la plage de température de l'assemblage ne doit pas excéder un maximum de 204°C. Avec les adhésifs structuraux, il est préférable d'utiliser un activateur sur une des deux surfaces à coller pour diminuer la période de fixation et éliminer le besoin d'un long crampage. Un accélérateur avec un adhésif structurel donne un temps de crampage de 2 à 5 minutes.

Comme toutes les autres colles industrielles disponibles sur le marché, la meilleure façon d'utiliser une colle structurale anaérobique se trouve avec un bon design de joint, qui porte au maximum les forces de cisaillement et au minimum les forces de choc et clivage. De toute façon, le collage avec un anaérobique sera beaucoup plus puissant et durable qu'avec un cyanoacrylate. La structure moléculaire, qui donne à l'adhésif anaérobique la forme d'un plastique thermodurcissable, lui donne aussi une force de liaison supérieure à celle du cyanoacrylate pour le choc et les autres forces concentrées. Une application pour ce genre d'adhésif sera présenté plus loin, ce qui montrera la robustesse et la puissance de ces adhésifs dans le collage du métal sur les pièces de renfort.

Un nouveau développement dans la formulation des adhésifs structuraux anaérobiques est d'ajouter des initiateurs réceptifs aux rayons ultra-violets dans la formulation de l'adhésif. Ce nouveau pouvoir de l'adhésif lui donne la capacité de sécher rapidement dans les interstices exposés aux rayons ultra-violets, ce qui donne un temps de fixation de quelques secondes avec des rayons de haute intensité. Le séchage du reste de l'adhésif entre les pièces se poursuit avec son mécanisme d'auto-durcissement anaérobique. Le seul obstacle à son usage plus universel est qu'avec un produit qui est sensible aux rayons ultra-violets, l'équipement nécessaire pour le séchage rapide peut coûter plus de 3000$.

Suivre les directives ci-dessous produira les meilleurs résultats avec les adhésifs anaérobiques.

1. Nettoyer toutes les surfaces de collage (cette étape n'est pas nécessaire quand l'application se porte vers le blocage des filets).

2. Dans le collage structural, porter au maximum les forces du cisaillement et au minimum les forces de choc et clivage.

3. S'assurer que les interstices entre les surfaces à coller ont moins de 1 mm.

L'information technique au sujet des colles anaérobiques et cyanoacrylates est obtenue du fabricant ou vendeur de ces colles. Voir la figure 2 pour une brève description des produits appartenant à la famille cyanoacrylate et anaérobique.

LES APPLICATIONS

Le design de l'assemblage et les préparations de la surface des pièces à coller sont des points importants dans l'adhésion du métal et, particulièrement, avec des colles cyanoacrylates et anaérobiques. Ce point ne sera pas

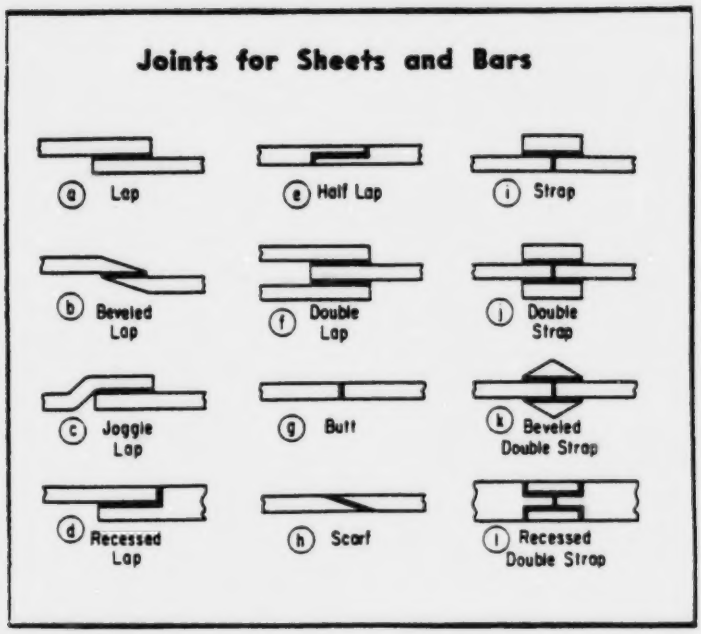
	ANAEROBIC	CYANOACRYLATE
Tensile shear-steel*, psi (ASTM D-1002)		
2 mils	4,000	3,000
20 mils	3,000	—
Tensile shear-aluminum**, psi (ASTM-D 1002)		
2 mils	3,300	2,500
20 mils	2,200	—
Impact-steel ft lb/in.² (ASTM D-950)	25	4 - 8
T-Peel-steel lb/in. (ASTM D-903)	60	2
Thermal operating range °F	−60 to 400	−40 to 175
Hot Strength % Retained (ASTM D-1151)		
200°F	56	70
300°F	49	5
350°F	18	0
Solvent Resistance (ASTM D-896) % Retention — 188°F., 14 days		
Motor Oil	100+	65
Gasoline	55	60
Water	55	0
Phosphate Ester	98	20
*Degreased, sand blasted steel **Degreased Aluminum		

Figure 2 Propriétés des colles anaérobiques et cyanoacrylates

discuté en détail mais la figure 3 illustre des assemblages utilisant les meilleures propriétés solides des adhésifs en général. Une préparation de la surface avant le collage donne aussi de bons résultats d'adhésion.

Les préparations de surface peuvent commencer par un simple nettoyage avec du solvant liquide ou en phase vapeur. Une abrasion mécanique, aidée d'un nettoyage par solvant, est aussi utile. Ce sont souvent les seules préparations nécessaires pour la plupart des applications. Quand l'application approche un point critique, comme dans l'assemblage des ailes d'avion, il est recommandé de faire une préparation chimique de la surface, comme un décapage avec un acide. Cette forme de préparation utilise des concentrations d'acides sur le métal qui est traité avec un nettoyage complet avant et après le traitement d'acide pour créer une surface stable et réceptive à l'adhésion.

a)



b)

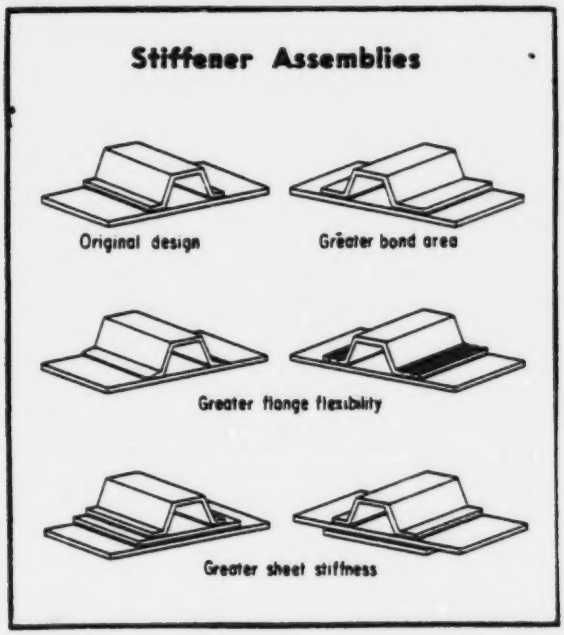


Figure 3a) Types de joints collés pour plaques

b) Conception de raidisseurs collés.

Comme on l'a déjà discuté, les colles cyanoacrylates, autrement dit les colles instantanées, sont utilisées dans l'industrie du métal pour attacher en permanence les pièces de plastique ou de caoutchouc sur le métal. Quant au collage du métal, il se comporte mieux pour coller les pièces non structurales de métaux qui se trouvent dans l'industrie électronique. Les cyanoacrylates donnent plutôt un collage temporaire ou bien un crampage sur les pièces structurales de métal.

Une application typique utilise la force de fixation rapide et la résistance faible au choc des cyanoacrylates. Par exemple, dans le coupage et l'usinage des pièces de métal, le crampage de ces pièces peut être impossible sans que cela gêne le procédé de machinage complet. Avec quelques gouttes d'un adhésif cyanoacrylate, un crampage rapide et puissant des pièces d'usinage est possible. Quand l'usinage de la pièce est fini, un choc de marteau casse facilement le collage. Si la pièce est trop sensible au choc, la chaleur élevée d'une torche ou d'un pistolet à air chaud peut dégrader l'adhésif.

Dans la construction des modèles de métal léger comme l'aluminium, il est possible de coller les panneaux aux renforts pour un crampage facile et rapide. Ainsi, l'assemblage d'un modèle ou prototype peut se faire avec facilité et rapidité.

Les applications où des pièces de plastique ou de caoutchouc doivent être collées sur le métal en permanence sont beaucoup plus diverses. Cependant, ce sujet est hors du propos de cette présentation.

Les adhésifs du freinage et fixation anaérobiques sont de grande importance dans la fabrication d'équipement pour vente initiale aussi bien que dans l'industrie de réparation et d'entretien des équipements. Leur usage et si divers que seuls quelques exemples seront présentés. Dans tous les cas, leur importance dans l'usinage et l'entretien économise en utilisant des attaches mécaniques avec moins de précision ou sans les attaches de sécurité encombrantes.

Situation d'entretien

Dans la première étape de la fabrication des pièces de métal, les adhésifs anaérobiques de freinage et de fixation, aussi bien que les adhésifs structuraux anaérobiques, se comportent bien dans les machines d'usinage (fig. 4). Ces outils sont connus comme les tours à rectifier, les fraiseuses, les aléseuses et les perceuses. Ils ont tous le même problème des attaches filetées qui se relâchent à cause des vibrations.

Pièces	Le remède anaérobique
1. Moteur électrique	Fixation des clavettes, blocage ou freinage des attaches filetées, fixation des manchons et coussinets.
2. L'arbre	Fixation des manchons et coussinets.
3. Table ou lit de soutien	Collage structural des pièces d'usure.
4. L'outillage	Collage structural des cales d'épaisseur, des emblèmes d'identification et des prolongateurs d'outils.

Situtations d'un fabricant

La chambre d'une électrode (fig. 5) normalement assemblée à pression entraînait un taux de rejet de 15% avec une production mensuelle de 30 000$. L'assemblage fonctionne dans une atmosphère de gaz propane et dans une gamme de température atteignant un maximum de 120°C.

Solution: Un liquide de fixation anaérobique qui remplace l'assemblage à pression avec un assemblage libre. Avec 0,01$ d'adhésif/pièce, le fabricant a éliminé son rejet de 15%.

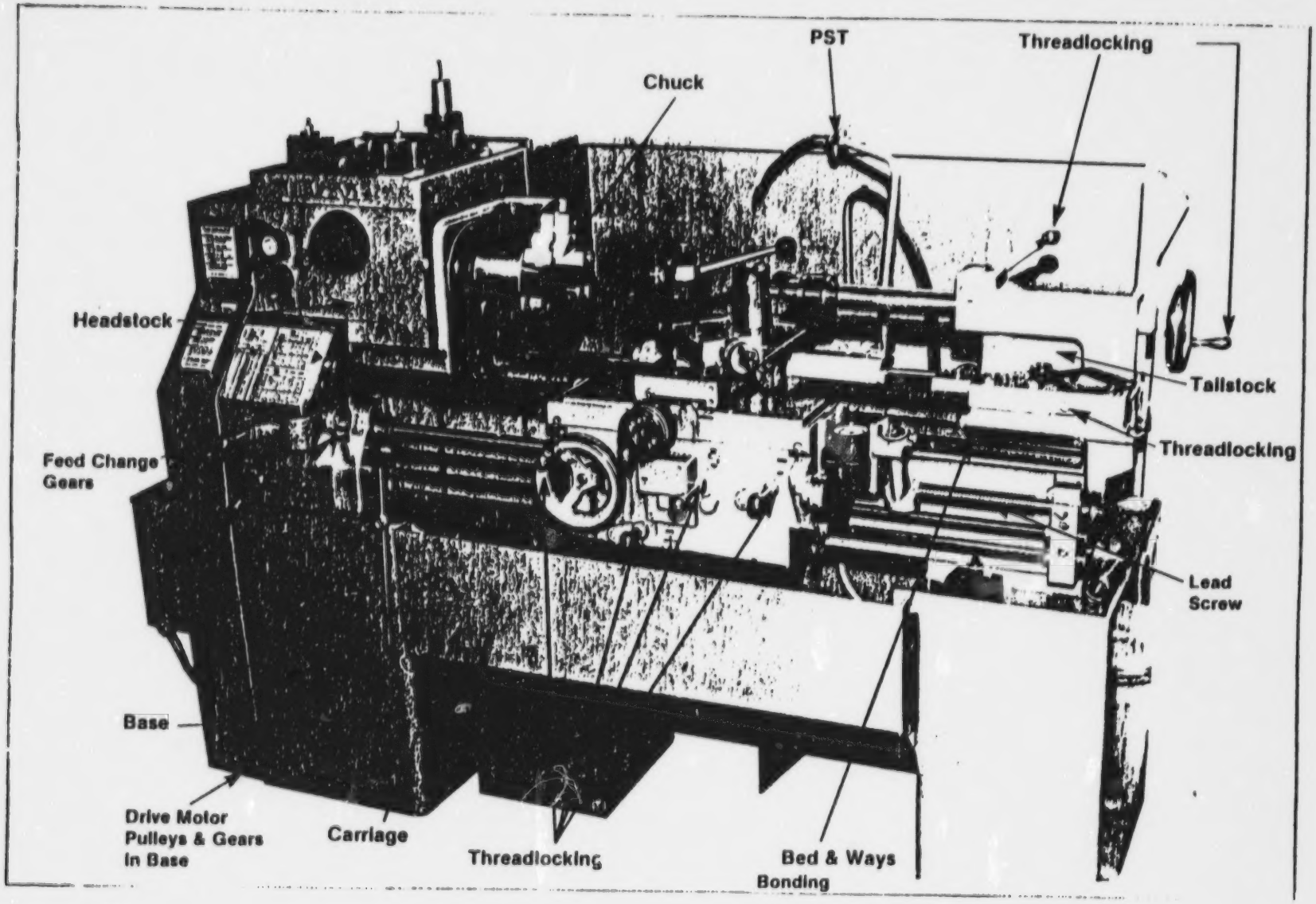


Figure 4 Utilisation des adhésifs anaérobiques dans les machines-outils

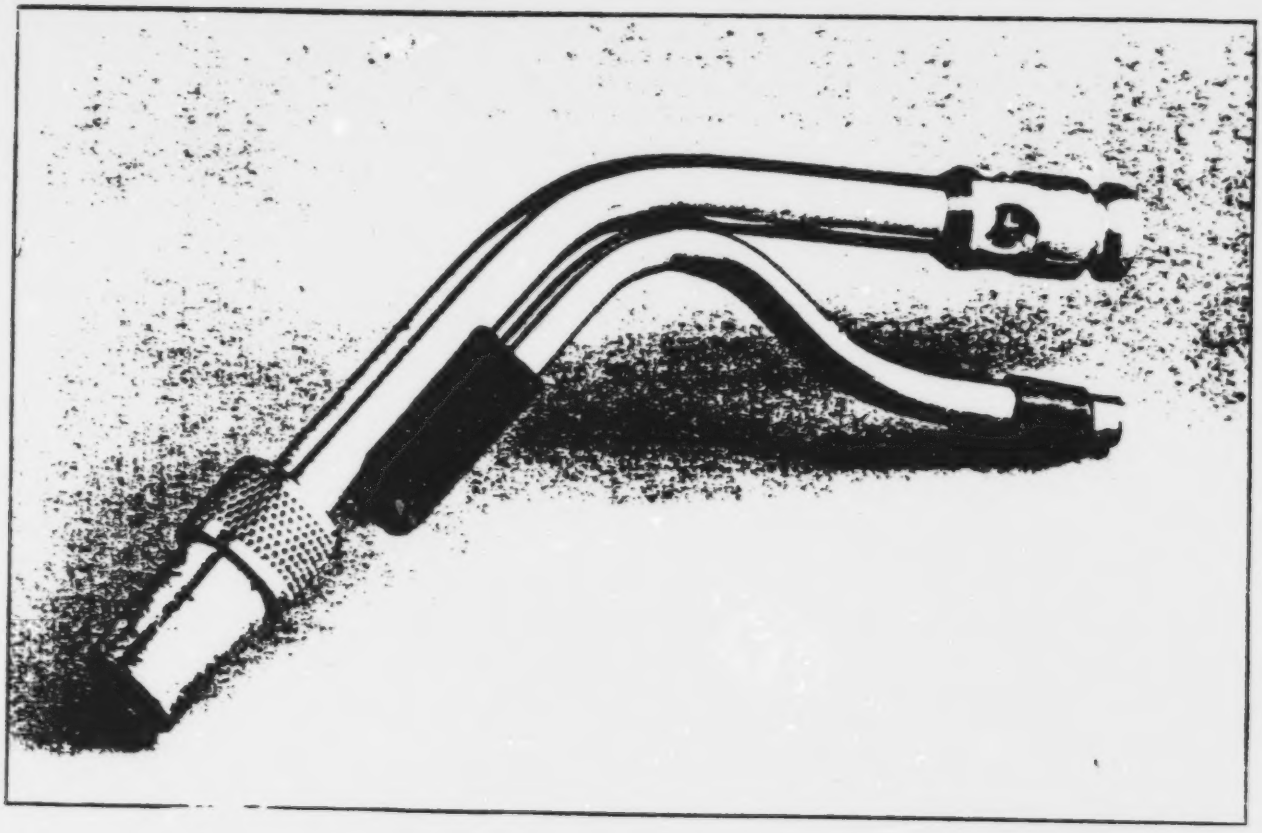


Figure 5 Chambre d'électrode

Comment: L'adhésif anaérobique, avec son mécanisme d'auto-durcissement dans l'interstice entre les pièces cylindriques ne se rétrécit pas et polymérise à 100%, ce qui donne une pièce robuste.

Situation d'un fabricant

Un fabricant d'automobiles Renault demandait à son groupe de génie mécanique un moyen d'assemblage d'un engrenage de différentiel (fig. 6) sans le poids excessif qu'amènent les attaches mécaniques. Les autres critères portaient vers l'augmentation du couple d'entraînement, la meilleure fiabilité de l'ensemble, la réduction du poids et de la dimension de l'assemblage, et la diminution du coût d'asemblage. Auparavent, les ingénieurs considéraient

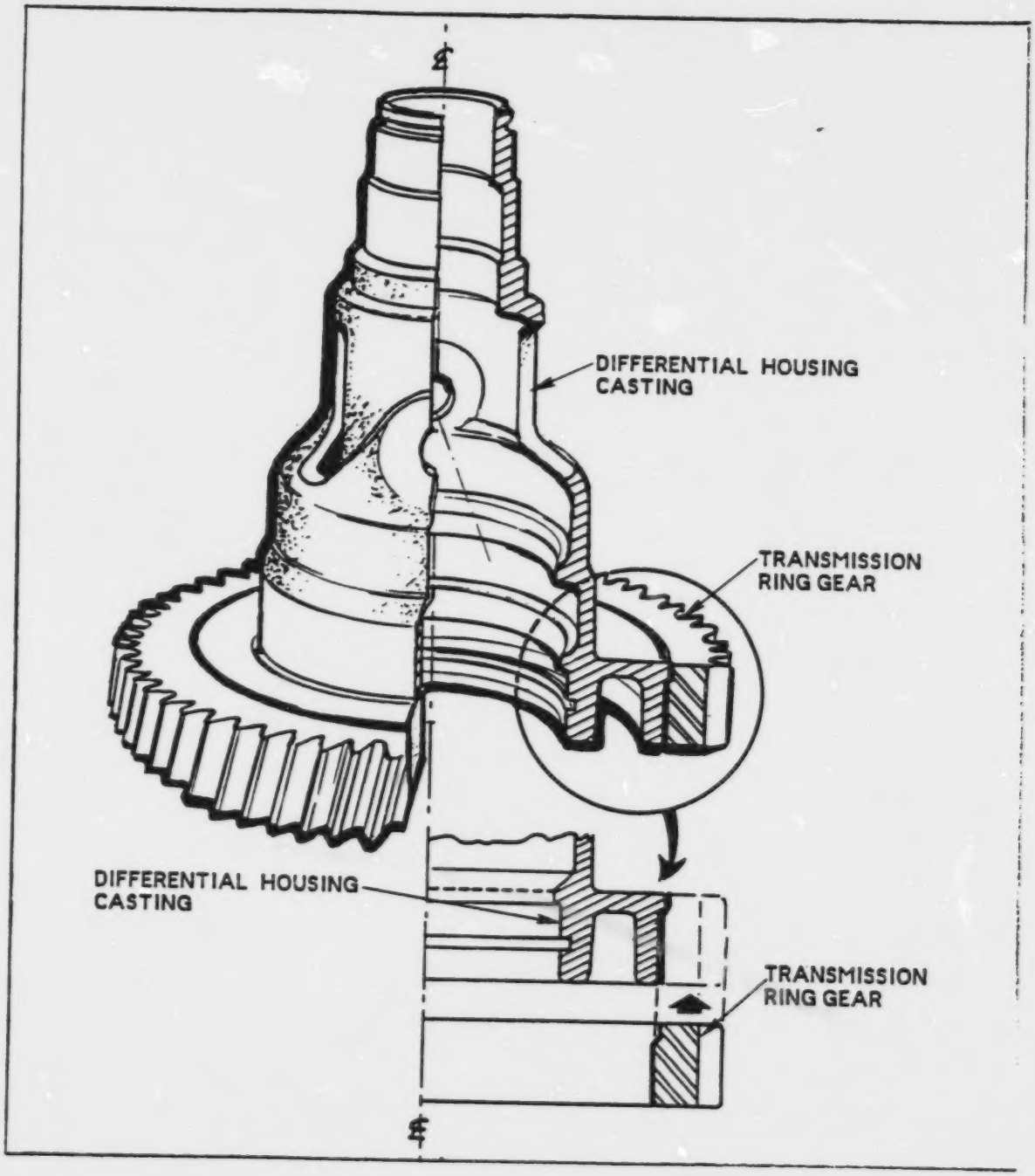


Figure 6 Engrenage de différentiel

des fixations à haute pression ou l'assemblage à chaud de l'engrenage sur sa boîte. Mais il y avait un problème de déformation des pièces et des défaillances précoces résultant de la fatigue du métal. La production était d'un million de pièces par an.

Solution: Un adhésif de fixation anaérobique pour les pièces cylindriques est utilisé avec une légère fixation au chaud. Ainsi, une résistance trois à quatre fois plus haute qu'avec une fixation à haute pression a été réalisée.

Comment: Dans les applications où il est nécessaire d'avoir une fixation mécanique, les pâtes ou liquides anaérobiques augmentent la résistance aux forces de cisaillement par un facteur de trois ou quatre. Ainsi, en remplissant les espaces microscopiques dans les intertices métalliques et collant grâce à son action d'auto-durcissage, le besoin d'avoir de grosses pièces métalliques pour les fixations à haute pression n'existe plus.

La plus grande contrainte à l'usage universel des adhésifs structuraux anaérobiques est la limitation du séchage à travers un maximum de 1 mm. Dans la fabrication des panneaux de métal de grandes dimensions, leur renfort peut comporter des surfaces de collage avec des interstices en excès de 1 mm. C'est surtout dans ces applications, comme on en trouve dans la construction des édifices, qu'il est préférable d'utiliser les autres types d'adhésifs structuraux. Ce ne sera pas long avant que ce problème soit résolu. Dans les conditions de laboratoire, des formulations ont été réalisées avec le pouvoir de sécher à travers des interstices atteignant 2 à 3 mm! De toute façon, avec un bon design, la plupart des applications dans la fabrication permanente du métal peuvent se résoudre avec les adhésifs structuraux anaérobiques.

Dans les deux prochaines applications, il est important de noter que les avantages du collage sur la soudure sont l'élimination des traces de soudure sur les pièces esthétiques, la réduction du besoin d'avoir de la main-d'oeuvre spécialisée occupée avec les besognes non nécessaires et l'avantage d'un

assemblage qui est, non seulement collé, mais aussi scellé contre la corrosion.

Situation d'un fabricant

Un fabricant de pièces électriques tenait compte qu'avec son procédé d'assemblage au silicone, il fallait attendre jusqu'à 48 heures avec un crampage pour un séchage complet de son adhésif. L'assemblage consistait en deux aimants dans une enceinte d'aluminium.

Solution: Un adhésif structural anaérobique et sensible aux rayons ultra-violets s'utilise maintenant pour un collage rapide des aimants dans l'aluminium. En passant une lumière aux rayons ultra-violets autour de l'adhésif, on a une fixation en moins de dix secondes. L'auto-durcissement anaérobique peut alors continuer tout seul sans besoin de crampage.

Solution: Ce genre d'adhésif structural avec son système de séchage mixte donne une fixation très rapide quand il est exposé aux rayons puissants de la lumière ultra-violette. Le séchage peut alors se compléter anaérobiquement.

Situation d'un fabricant

Un nouveau design exigeait la fabrication d'une remorque en aluminium (fig. 7) avec un poids plus faible et une structure plus flexible que les autres remorques sur le marché. Production de 50 par mois.

Solution: Le fabricant a utilisé toute la technologie anaérobique pour de meilleurs résultats. Il a utilisé les adhésifs de freinage et de blocage aussi bien que les adhésifs structuraux.

Comment: Les ingénieurs de ce nouveau design ont utilisé des écrous de Huck en acier inoxydable, collés et scellés avec des adhésifs de frei-

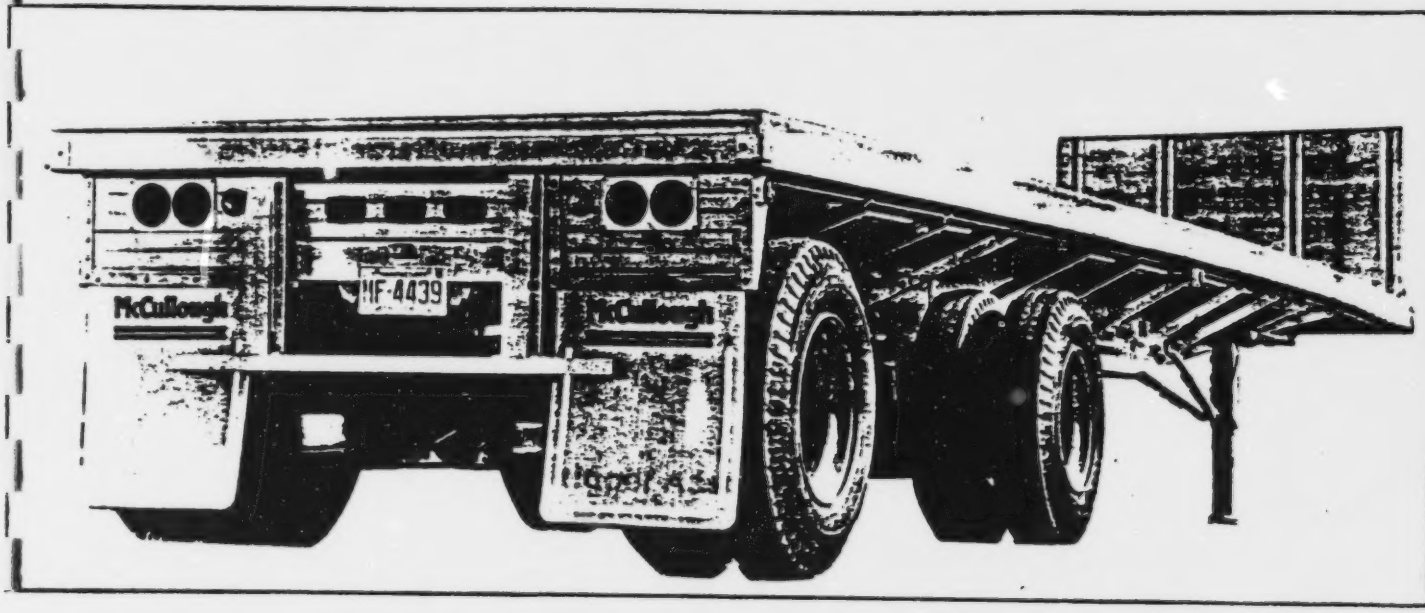


Figure 7 Remorque en aluminium

nage, pour fixer les panneaux d'aluminium déjà couverts avec les adhésifs structuraux anaérobiques. De cette façon, les adhésifs structuraux, en effet, doublent la force du crampage des écrous et scellent contre la corrosion. Les adhésifs de freinage bloquent contre le desserrage des écrous.

L'action des adhésifs de freinage est telle que discuté auparavant; une polymérisation auto-durcissable qui élimine le besoin d'autres attaches mécaniques plus coûteuses et mois fiables. Le collage des panneaux d'aluminium sur le renfort se déroule en dépit du fait que l'aluminium est reconnu comme un métal inactif pour les adhésifs anaérobiques. Cependant, l'aluminium utilisé (6061) contient de 0,1 à 0,4% de cuivre et jusqu'à 0,5% de fer, ce qui rend le métal légèrement actif. Le séchage, sans activateur, procède alors lentement. Ceci laisse beaucoup de temps pour l'alignement des pièces d'aluminium de douze mètres de longueur avant la fixation permanente par l'anaérobique.

En somme, les adhésifs cyanoacrylates et anaérobiques ont trouvé leur niche dans l'industrie de la fabrication et l'assemblage des pièces en métal. La tâche la plus importante qui reste aux fabricants et aux vendeurs de ces adhésifs est d'éduquer une grande partie des fabricants d'équipement et les professionnels d'entretien sur le meilleur usage de ces adhésifs dans leurs industries.

LES ADHÉSIFS RENFORCÉS DANS LE COLLAGE STRUCTURAL

par

Christian Rippe

Permabond S.A.
18 rue JM Poulmach
94200 Ivry/Seine
FRANCE

Le Collage Structural des Métaux
CNRC/IGM, 29 mars 1988, Boucherville (Québec)

Introduction

Jusqu'à l'apparition des adhésifs "renforcés", l'assemblage des composites polyester ou époxy avait toujours posé de nombreux problèmes. En fait, on considérait généralement qu'à moins de réaliser un bon collage lorsque le matériau était encore vert - c'est-à-dire dans sa phase de pré-polymérisation - on n'obtenait qu'un mauvais joint. Cette croyance était fondée d'après l'observation des performances obtenues quand la résine polyester elle-même était utilisée comme colle, quoique la fragilité inhérente à de tels joints ait été partiellement améliorée par l'emploi d'adhésifs polyuréthanes. Ceux-ci à leur tour engendrent d'autres difficultés dans la manipulation et la durabilité du joint sur composants métalliques.

Puis les premiers adhésifs "renforcés" firent leur apparition dans l'assemblage de panneaux de portes en SMC (Sheet Moulding Compound). Ils ont su prouver leur faculté d'adaptation qu'ils soient à base acrylique ou époxy. Ils se montrent faciles à utiliser, robustes, durables et relativement exempts de risques toxiques. A cette expérience pratique s'ajoutent maintenant des études théoriques de conception d'assemblages collés qui donnent un aperçu fort utile sur la répartition des contraintes dans les joints ainsi réalisés. Bien que cette technique ne soit pas encore très développée, l'analyse de la répartition des contraintes doit permettre la mise au point de formes de joints plus efficaces.

Un programme information est actuellement développé par la société PERMABOND.

I - COMMENT FONCTIONNENT LES ADHESIFS

1.1 - Force de cohésion

Outre les phénomènes d'adhésion et leurs différents aspects, il est intéressant de s'arrêter sur la force de cohésion des adhésifs.

A ce jour, aucun adhésif ne possède ni la force cohésive du métal ni celle des matériaux composites. Dans ceux-ci la force cohésive de la structure du polymère de base est renforcée par des fibres (fibres de verre, etc...) qui y sont incluses. Donc, à l'exception d'un gel-coat, l'adhésif aura toujours tendance à être le maillon le plus faible dans un assemblage.
Par conséquent, il faut prendre soin à ce que les contraintes auxquelles sera soumis l'adhésif ou le gel-coat soient bien conformes à leurs capacités.

Il est tout aussi important de comprendre comment les adhésifs fonctionnent, que comment et pourquoi ils ne tiennent pas. Un de leur tout premier défaut fut la fragilité des adhésifs traditionnels à hautes performances et des polyesters qui ont été longtemps employés pour l'assemblage de composites. Pour obtenir des résistances en traction-cisaillement importantes - et par conséquent avoir la capacité de supporter de fortes charges - il fallait réaliser des joints très rigides mais cassants. De tels matériaux sont malheureusement peu résistants aux chocs et la déformation momentanée du matériau collé lors du choc et particulièrement dans le cas d'un composite flexible, va générer de puissantes forces de clivage et de pelage auxquelles ces adhésifs ne sont généralement pas capables de résister.

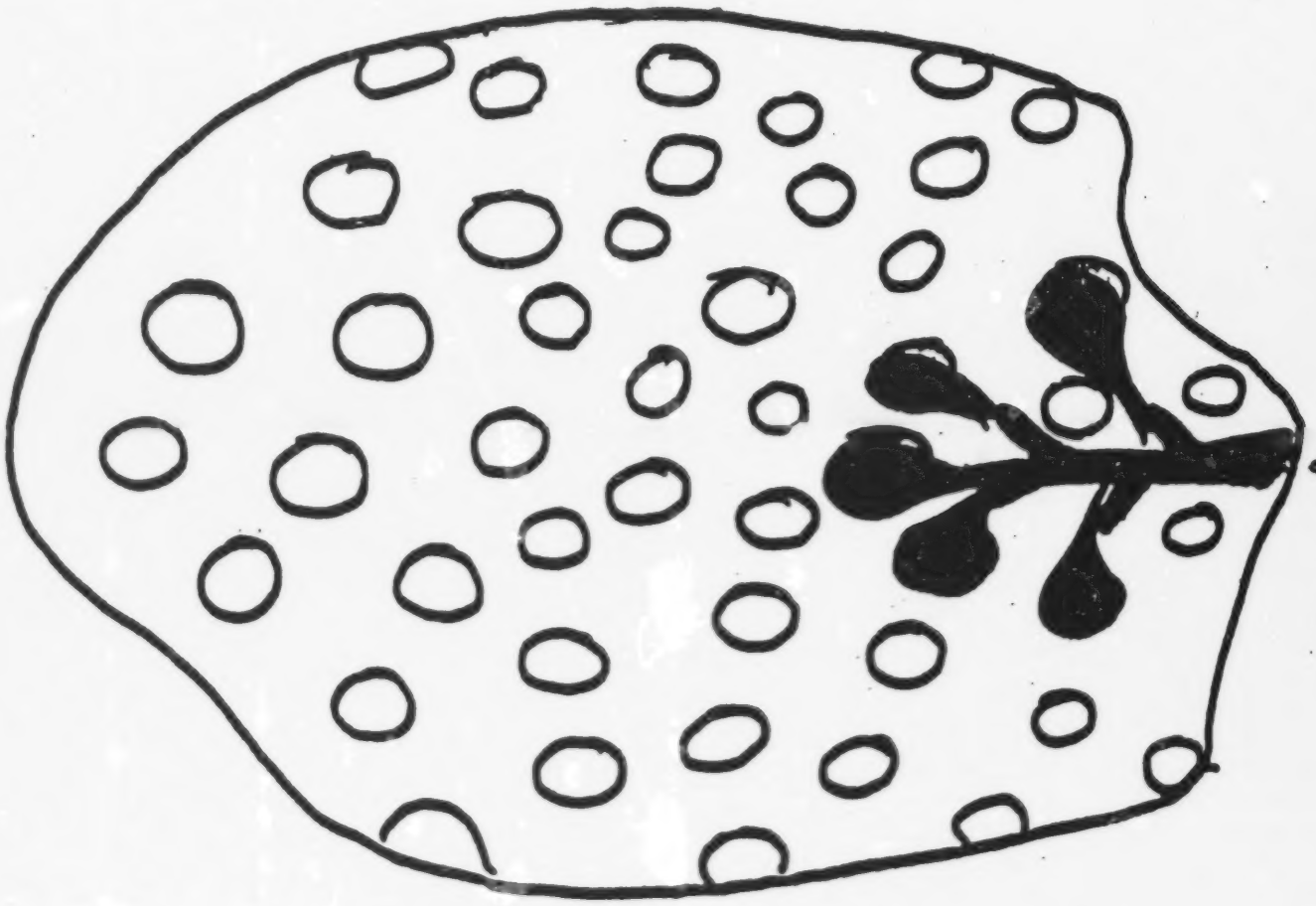
Cette tendance d'un joint surchargé à se rompre quand il est déformé, a été partiellement supprimée par l'introduction d'adhésifs plus ductiles et des adhésifs "renforcés".

Ces derniers empêchent la propagation de la fissuration (dûe par ex. au choc) grâce à l'incorporation d'une phase "caoutchouc" dispersée dans l'adhésif. Cette phase est une dispersion homogène et contrôlée de microsites à base caoutchouc qui sont physiquement séparés du matériau "porteur" (époxy, acrylique...) mais à la différence des charges traditionnelles ou plastifiantes, ils sont chimiquement liés au matériau. Quand l'adhésif est surchargé, les forces qui induisent et propagent les fissures se dissipent alors dans la phase caoutchouc flexible. Une méthode similaire est employée en mécanique pour arrêter la propagation d'une fissure (perçage à son extrémité) dans une pièce de fonte, métal ou de plastique.

D7 Adhésifs renforcés : propagation des fissures

L'énergie de fracture est ainsi dispersée à la périphérie du trou percé au lieu d'être concentrée à l'extrémité de la fissure.

ADHESIFS RENFORCES :
MECANISME D'ARRET DE PROPAGATION DES FISSURES



SOUS LA CHARGE DEBUT
DE LA CRAQUELURE
QUI GROSSIT MAIS
EST ARRETEE

Quoique le développement des adhésifs "renforcés" ait été limité à divers types d'adhésifs acryliques et d'époxys, l'amélioration de leurs performances générales a été spectaculaire. Sans pour autant sacrifier leur puissance et leur résistance en fatigue et au fluage, leur durabilité a été considérablement augmentée ainsi que leurs performances en tenue à l'impact et au pelage.

Pour ces raisons, on considère généralement les adhésifs "renforcés" comme étant les plus adaptés au collage de composites.

II - ADHESIFS STRUCTURAUX

Beaucoup d'adhésifs conviennent à la fois aux collages des matériaux composites et des divers métaux et alliages de métaux. Cependant, lorsqu'il s'agit de réalisation structurale, seuls les types "renforcés" acryliques et époxys ainsi que les adhésifs type polyuréthane s'avèrent être de sérieux candidats.

Pour des questions de temps, je me limiterai aux familles époxys et acryliques.

2.1 - Acryliques : description

C'est un groupe en développement rapide. Les adhésifs "renforcés" sont basés sur une variété de monomères acryliques. Ils contiennent une phase caoutchouc élastique dispersée, physiquement séparée mais chimiquement liée à la matrice, qui la "renforce". On peut en modifier assez facilement la viscosité. On en trouve ainsi sous forme de liquides, résines sirupeuses et semi-solides thixotropes. Le processus de polymérisation de toute cette famille est basé sur la polymérisation du radical du groupe vinyl-acrylique qui transforme un état 100 % liquide en solide.

La polymérisation est généralement induite par un durcisseur catalytique séparé. Il peut être appliqué séparément sur la surface à coller, avant l'application de l'adhésif, ou bien il peut être mélangé directement avec l'adhésif juste avant l'emploi. La première méthode est très pratique mais là où interviennent des jeux importants, la seconde est inévitable.

Tous ces adhésifs sont faits pour polymériser à température ambiante, quelques uns peuvent être chauffés afin d'accélérer ce processus.

Caractéristiques :
Les propriétés de ce groupe d'adhésifs apportent aux techniciens une immense liberté. Les divers "acryliques renforcés" disponibles possèdent une résistance extrêmement importante au pelage et à l'impact, de plus ils sont très durables.

Le seul problème est le nombre limité de formulations spécifiques développées jusqu'à présent. Cependant, ils peuvent déjà faire face à de nombreuses demandes et devraient être utilisés chaque fois que l'on recherche une performance élevée.

Compatibilité avec les supports :
A l'exception des polyoléfines et autres plastiques qui possèdent une faible énergie de surface comme le PTFE, ils s'accommoderont de presque tous les alliages techniques et de beaucoup de plastiques. Le relâchement de contraintes ("stress cracking") ou même dissolution de quelques plastiques est un risque de certaines versions de ces adhésifs.

Principaux avantages :
Ce groupe s'accommode plutôt bien des surfaces grasses, est facile d'emploi, robuste et certaines versions seront capables de combler des jeux importants. Un grand choix de vitesses de prise est disponible.
Chez PERMABOND le groupe des F246.

Restrictions principales :
Cette famille d'adhésifs est relativement nouvelle. Elle manque quelque peu de formulations spécifiques capables de faire face à tous les besoins industriels et aux situations où de tels matériaux peuvent apporter une aide considérable. Le remplissage des jeux reste un problème important de beaucoup de formulations. Certains ayant tendance à induire des fissures par relâchement de contraintes dans des thermoplastiques prédisposés à ce phénomène (mais pas le polyester renforcé fibre de verre).

Problèmes rencontrés :
Pris dans son ensemble, le groupe s'est montré particulièrement fiable, même sur surfaces sales et/ou grasses. Certains types voient leur polymérisation inhibée par des contaminations de surface d'origine chimique.

Equipement de Mise en Oeuvre :
L'équipement requis va du distributeur pour tubes ou cartouches à de simples applicateurs par pression, aux équipements complexes de mélange et de dosage. Ces derniers sont utilisés pour la fabrication en série où les formulations épaisses et thixotropes à mélanger sont indispensables au remplissage des jeux.

Hygiène et Sécurité :
Un système de ventilation doit être utilisé lorque l'on utilise en continu les versions les plus volatiles ou lorsque l'on vaporise des primaires de surface. Jusqu'à présent, l'expérience industrielle de cette nouvelle famille s'est avérée satisfaisante et les matériaux sont considérés comme non dangereux. Néammoins, tous les produits du groupe devraient être considérés comme physiologiquement actifs même à un faible degré et des précautions appropriées seront prises.

2.2 - Epoxy : description :

Les adhésifs époxys sont des résines thermodurcissables qui durcissent par polymérisation. Comme les acryliques, les versions "renforcées" contiennent une phase caoutchouc dispersée. Une fois durcis, ils ramolliront à la chaleur mais ne fondront pas. Les systèmes à deux composants (résine et durcisseur) deviennent solides par mélange (quelquefois en chauffant le processus sera accéléré). Les produits à un composant par contre ont besoin de la chaleur pour permettre au catalyseur latent de réagir. Les propriétés des époxys varient avec les types de durcisseurs et de résines employés. Les époxys généralement possèdent une grande puissance d'adhérence, sont résistants aux huiles et solvants et présentent peu de retrait à la polymérisation. Ils donnent des liaisons puissantes et durables alliées à une excellente résistance au fluage, à la fatigue et à l'impact. Les versions "renforcées" les rendent particulièrement aptes aux applications structurales.

Caractéristiques :
Leur vitesse de polymérisation est relativement faible et varie selon les formulations. Leur viscosité relativement élevée peut les rendre difficiles à utiliser sur de très petits assemblages. Mais la difficulté majeure rencontrée par l'ingénieur est que jusqu'à présent, le nombre de formulations d'époxys réellement "renforcés" est encore limité et rend difficile les réponses spécifiques à des besoins particuliers qui, un jour pourtant seront du ressort de ce groupe de produit.
Leur tenue en température est de l'ordre de 200° C pendant quelques heures.

Compatibilité avec les supports :
Elle est excellente avec les thermodurcissables. Les matériaux tels que les plastiques polyoléfines ("Polyéthylène") et les types similaires de matériaux à faible énergie de surface comme les "Téflons" et caoutchoucs silicones ne peuvent être collés à moins d'un traitement de surface spécial.

Préparation de surface :
A l'exception de quelques formulations spéciales et des versions "renforcées" qui polymérisent à chaud, cette famille de produits demande généralement une bonne préparation de surface. Les variantes "renforcées" polymérisant à chaud se montrent très tolérantes quant à la pollution de surface quoique des difficultés puissent apparaître en présence d'huiles à base de protéines sur des surfaces métalliques.

Principaux avantages :
Puissance, durabilité.
Contrairement aux adhésifs avec activateur de surface, la vitesse de prise est tout à fait indépendante de l'état chimique de la surface.

Principales restrictions :
A quelques exceptions près, les vitesses de polymérisation sont lentes à moins que les adhésifs ne soient chauffés. La préparation (dosage et mélange) des systèmes à deux composants doit être précise et soigneuse. Ces produits peuvent être désagréables à utiliser et difficiles à nettoyer. La vitesse de prise peut varier d'une manière incontrôlable si l'on mélange de grandes quantités ou s'il y a des variations importantes de la température ambiante.

Problèmes rencontrés
Les problèmes rencontrés d'ordinaire sont causés soit par de mauvaises proportions de dosage du mélange soit par des variations de température. Invariablement la rupture de l'adhésif est presque toujours associée à la contamination de la surface.

Equipement et mise en oeuvre :
De petites quantités sont aisément mélangées à la main. Les versions à un composant sont appliquées directement du tube ou de la cartouche. Pour les produits à deux composants, un équipement de dosage et de mélange est souvent complexe et coûteux.

D8 Epoxy bi-composant : dispositif manuel d'application

Hygiène et sécurité :
Les résines époxys bi-composants sont considérées comme potentiellement toxiques. Les dermatoses et autres problèmes similaires qui apparaissent occasionnellement lors de l'emploi de ces produits sont presque invariablement associés à l'emploi des durcisseurs à base d'amines. Ces durcisseurs de base amine dégagent des vapeurs et nécessitent donc une ventilation. Les adhésifs époxys monocomposants polymérisant à chaud sont particulièrement exempts de risques toxiques. En effet, le durcisseur catalytique ne devient actif qu'à température élevée. Ils sont employés dans des étuves ventilées et par conséquent, on peut les ranger parmi les époxys les plus sûrs et même au sens le plus large, de l'ensemble des adhésifs à hautes performances.

2.3 - Les vinyls-oxiranes (VOX)

Description :
Les VOX sont des adhésifs thermo-durcissables bi-composants polymérisant à froid. Ils présentent la propriété de durcir à l'air libre ou en milieu confiné, grâce à leur caractère anaérobie.

Les VOX sont des copolymères, où les séquences vinyls côtoient les séquences oxiranes, renforcées par une phase d'élastomère caoutchouc.

LES ADHESIFS RENFORCES

Caractéristiques
Leurs propriétés sont exceptionnelles. Ils sont dotés à la fois d'une très bonne tenue au cisaillement et d'une bonne tenue au pelage et au choc. De ce fait, leur tenue en fatigue est nettement améliorée par rapport aux époxys, plus rigides. Leur durabilité en joint collé est analogue à celle des acryliques renforcés.

Compatibilité avec les supports
Ils sont capables de coller des supports divers et variés sans traitement de surface particulier, notamment les aciers à surface grasse et les composites chargés. Sur les polyolépines, le PTFE, les restrictions d'emploi sont analogues à celles déjà rencontrées avec les époxys.

Principaux avantages
. L'avantage principal est que les VOX peuvent remplir des jeux importants, jusqu'à 20 mm en ambiance aérobie ou anaérobie. C'est un critère très important pour l'utilisateur, car le VOX . . peut résoudre des difficultés insolubles avec les acryliques (jeu > 0,2 mm).
. La vitesse de polymérisation est indépendante de l'état de surface et de la nature du substrat
. Ils polymérisent à température ambiante sans apport de chaleur.

DS VOX épaisseur du joint de colle

Principales restrictions
. Une tenue à la température légèrement insuffisante pour des utilisations en continu à température élevée (plage acceptable : - 60 °C à + 120°C)
. des VOX hautes températures jusqu'à 180 °C à 200°C sont actuellement en développement.

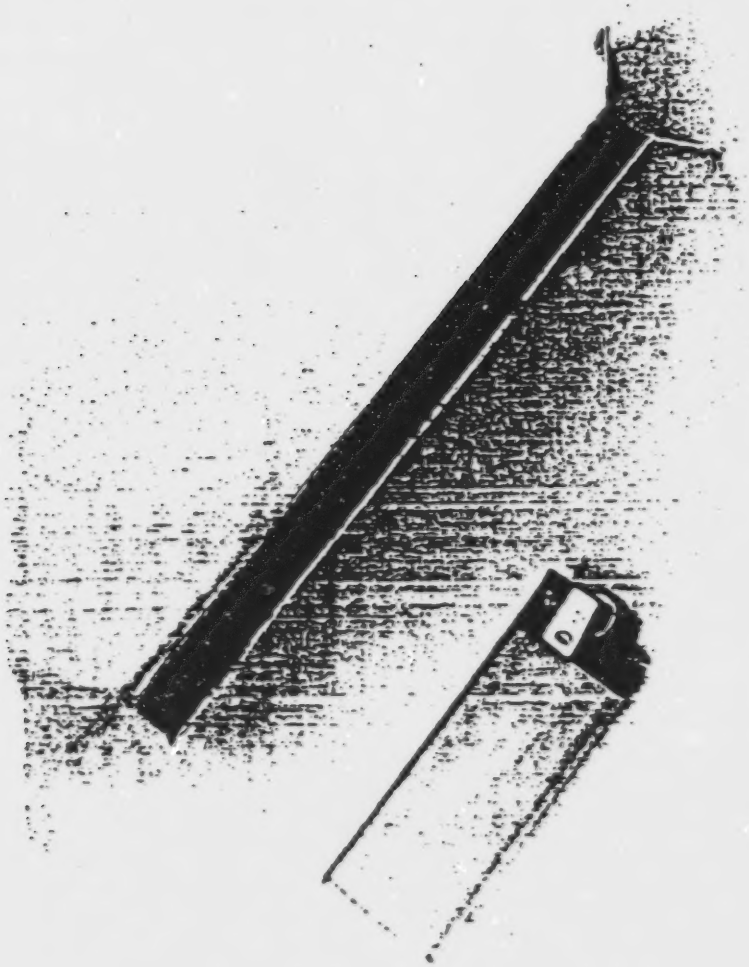
Equipement et mise en oeuvre
Le système, qui comprend deux composants, est conditionné dans une cartouche double munie d'un robinet et d'un mélangeur statique. Le VOX est distribué par un système de pistolet manuel ou pneumatique.

Hygiène et sécurité
Ces produits contenant des esters méthacrylates, il est impératif de travailler dans une atmosphère ventilée, de revêtir les protections individuelles en vigueur (se reporter à la fiche produits lors de l'utilisation).

2.4 - APERCUS DE RHEOLOGIE

Examen de courbe de polymérisation des trois types de colles évoqués (force de cohésion en fonction du temps).

VOX : EPAISSEUR D'UN JOINT DE COLLE



LES ADHESIFS RENFORCES

ADHESIFS RENFORCES

TABLEAU COMPARATIF

CARACTERISTIQUES \ TYPES ADHESIFS	F 246	ESP 110	VOX 501
Densité	1,0	1,5	1,0
Viscosité (mPa.s)	30 000	400 000	50 000
Polymérisation durée(mn)	5 à 60 *	45	60
Polymérisation Temp. (°C)	20	150	20
Temps de prise	5 à 10 mn	Pas de prise à température ambiante	5 à 20 mn
Résistance traction/cisaillement ASTM : aluminium/aluminium	30 N/mm²	41	18
Résistance traction/cisaillement ASTM : GRP	9 rupt. maté.	12,5 rupt. maté.	10 rupt. maté.
Résistance pelage ASTM (largeur 25 mm) (T)	150 N	142 N	150 N**
Résistance à l'impact ASTM	24,5 J	> 25 J	> 25 J
Résistance à la température (continu) perte de > 50 % module	120 °C	200 °C	120 °C
Résistance à 180 ° C	30 mn	-	30 mn

* selon initiateur
** épaisseur du joint supérieur à 0,5 mm

III - PREPARATION DE SURFACES

Ce sujet ayant été traité par ailleurs, je ne dirai que quelques mots sur la préparation spécifique à l'emploi des colles renforcées.

3.1 - Les composites

S'il n'y avait le problème des agents de démoulage, la plupart des matériaux composites pourraient être collés sans préparation de surface, spécialement avec les adhésifs acryliques "renforcés". Cependant comme ils existent, on doit tenir compte de leur présence.

Abraser légèrement et essuyer sera généralement suffisant pourvu que l'on n'ait pas employé des agents de démoulage à base de silicone. Dans la mesure du possible, il faut toujours les éviter car ils sont persistants et très difficiles à enlever.

La durabilité de l'interface adhésif/composite peut être améliorée par l'emploi de primaires silanes. Ils se présentent dans des mélanges spéciaux eau/alcool comme le type PERMABOND SIP qui offre l'avantage d'indiquer clairement si la surface est bien préparée et suffisamment propre pour donner un bon collage.

3.2 - Métal

Des trois types d'adhésifs considérés, les variantes acryliques ou VOX peuvent être employées pour n'importe quelle application sur métal non préparé.

C'est parce que les adhésifs "renforcés" ou VOX sont capables de dissoudre les résidus d'huiles ou de graisse de la surface du métal. Les adhésifs acryliques s'adaptent très bien à une surface salie car les matériaux qui les constituent sont capables de dissoudre un film d'huile. Ils ne contiennent pas de solvant en tant que tel. Leur base de monomères liquides de faible poids moléculaire réalise une transformation complète par polymérisation à l'état solide. Lors du durcissement, ils absorbent l'huile dissoute dans leur structure solide.
Les époxys à froid sont incapables de le faire d'une manière très efficace.
Par contraste, les époxys à deux composants polymérisant à froid sont des solvants peu efficaces. Pour cette raison, les surfaces doivent être soigneusement préparées avant le collage. Les époxys monocomposants acceptent bien des contaminations grasses car aux températures élevées de prise ils dissolvent bien les huiles. Il peut être nécessaire de mentionner que le poids moléculaire et la viscosité naturelle des époxys sont plus élevés que ceux des acryliques, cela réduit leur capacité aussi à bien "mouiller" les surfaces. Dans de telles circonstances, une préparation de surface efficace sera nécessaire. Un assemblage comportant de l'acier propre et fraîchement dégraissé se colle bien et à moins que l'assemblage métal/composite ne soit ultérieurement soumis à des conditions très sévères, aucun traitement supplémentaire n'est nécessaire. Mais, si des performances maxima sont requises, alors on utilisera un primaire silane (tel que le SIP).

LES ADHESIFS RENFORCES

L'aluminium fraîchement abrasé et dégraissé se colle bien. Cependant, si l'on doit exposer pendant des périodes prolongées à des conditions d'humidité, une préparation de surface complète sera alors nécessaire. On peut utiliser pour cela les procédés standards d'oxydation anodique chromique. Il ne faut pas oublier les primaires silanes car ils sont plus faciles d'utilisation que ces traitements d'oxydation et ils apparaissent être très efficaces sur de nombreux alliages.

D11 : Alliage d'aluminium traité par OAC.

IV - ETUDE ET CONCEPTION DES ASSEMBLAGES

Il y a trois paramètres importants qui doivent être pris en compte :

- la rigidité des supports,
- les charges qui seront supportées par la structure dans son ensemble,
- les aspects pratiques de l'assemblage

4.1 - Concepts généraux

Les contraintes en traction selon le plan d'un joint peuvent être très destructrices et doivent être évitées si possible. En fait il faut essayer de réaliser un assemblage qui contienne de par sa forme un élément compressible. Ceci parce que même des charges réduites peuvent être particulièrement destructives lorsqu'elles sont induites par un mécanisme de pelage.

Les charges de compression sont, elles, facilement supportables. La capacité relative d'un joint à supporter des contraintes en compression, cisaillement et pelage est fonction du ratio suivant :

ratio : 1000 : 100 : 1

On voit ainsi très bien la nécessité de réaliser un joint qui évite les forces de pelage. Si des contraintes de pelage et clivage doivent être supportées, on doit alors chercher d'autres moyens de maintenir le joint. Si cela n'est pas possible ni pratique, il vaut mieux redessiner complètement la forme de cet assemblage.

Une erreur fréquente à éviter est de croire que la contrainte sur un joint se répartit d'une manière uniforme. Même lorsqu'on utilise les adhésifs les plus souples, cet état idéal n'existe pas. De plus, la répartition des efforts dans le joint varie car le module des adhésifs et des matériaux évolue en fonction des changements de température.

Les modèles mathématiques et les logiciels qui sont disponibles à présent vont permettre d'examiner les interactions entre les modules des matériaux en jeu, la forme géométrique du joint et les diverses dimensions. Deux exemples, tirés de plusieurs études paramétriques, sont donnés ci-dessous.

EXEMPLE 1 :

Evolution dans la REPARTITION DES CONTRAINTES en fonction de l'EPAISSEUR DES SUBSTRATS et du type d'adhésif.

D12 : Contraintes/épaisseur support (résine polyester)

Cet exemple illustre l'évolution de la répartition des contraintes à l'intérieur d'un joint réalisé avec un polyester laminé du type SMC, à mesure qu'augmente l'épaisseur du laminé et que l'on change d'adhésif. Les caractéristiques du joint sont les suivantes :

Matériaux

Support	- feuille de composite SMC
Adhésif	- acrylique "renforcé" ou résine polyester isophtallique.

Géométrie du joint

Description	- simple recouvrement
Largeur	- 25 mm
Longueur recouvrement	- 25 mm
Epaisseur du support	- variable 1, 2 et 4 mm
Epaisseur de l'adhésif	- 0.2 mm

Contrainte

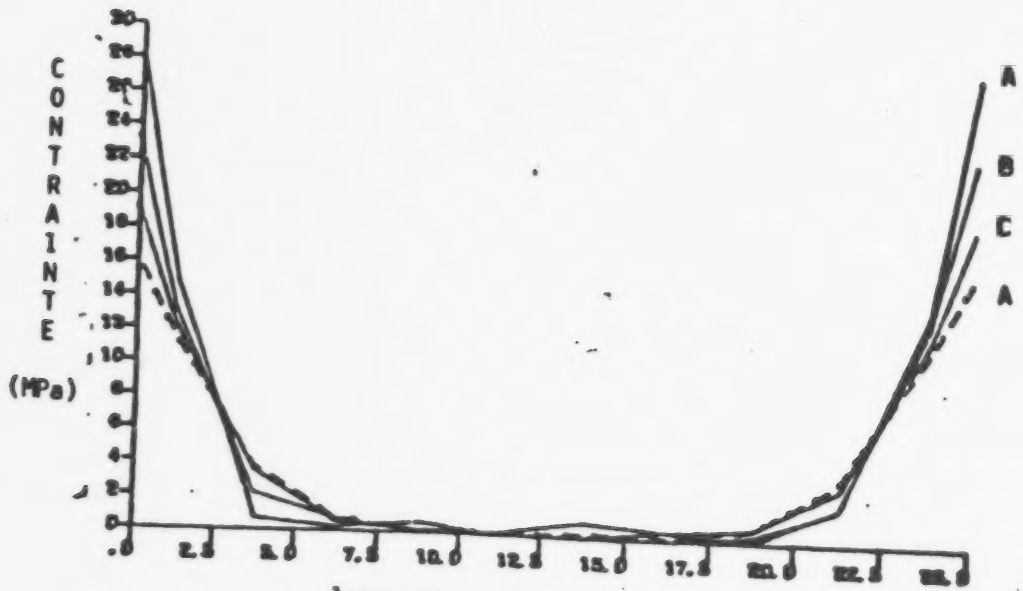
En traction	- 2 KN

D12 bis : Contraintes/épaisseur support (acier/acier)

Il apparaît clairement dans les illustrations D12 et 13 qu'au fur et à mesure de l'augmentation de l'épaisseur du support, il y a réduction progressive de la concentration de l'effort au bord du joint. Le support le plus résistant (et le plus rigide) permet le transfert de la charge dans la partie interne du joint. Cependant il est clair que la représentation de l'effort induit par l'adhésif souple (Illustration D 13) est toujours moindre par rapport à celle plus rigide de l'adhésif à base de résine polyester.

Le succès des adhésifs acryliques "renforcés" est partiellement dû à cet effet. Il est d'ailleurs particulièrement prononcé dans cet exemple car l'effort concentré au bord du joint de composite de 1mm d'épaisseur , collé avec de l'adhésif souple sera plus faible qu'avec des supports de 4mm collés avec de la résine polyester. La ligne A de l'illustration 12 a été superposée sur l'illustration pour faire ressortir cet effet plus clairement.

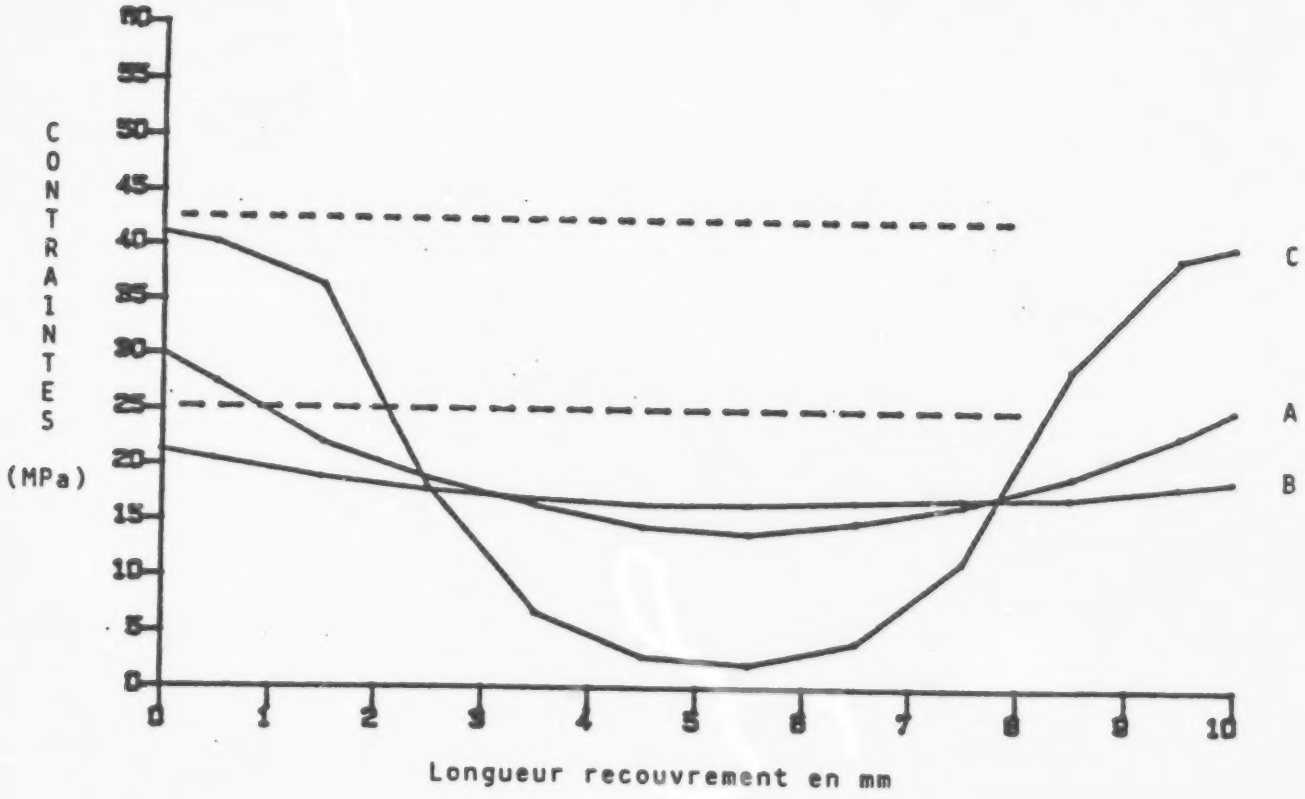
DISTRIBUTION DES CONTRAINTES EN FONCTION
DE L'EPAISSEUR DU SUPPORT
(SMC collé avec adhésif polyester)



Note 1. Trait plein "A" - 1mm Epaisseur de SMC
" " "B" - 2mm " "
" " "C" - 4mm " "

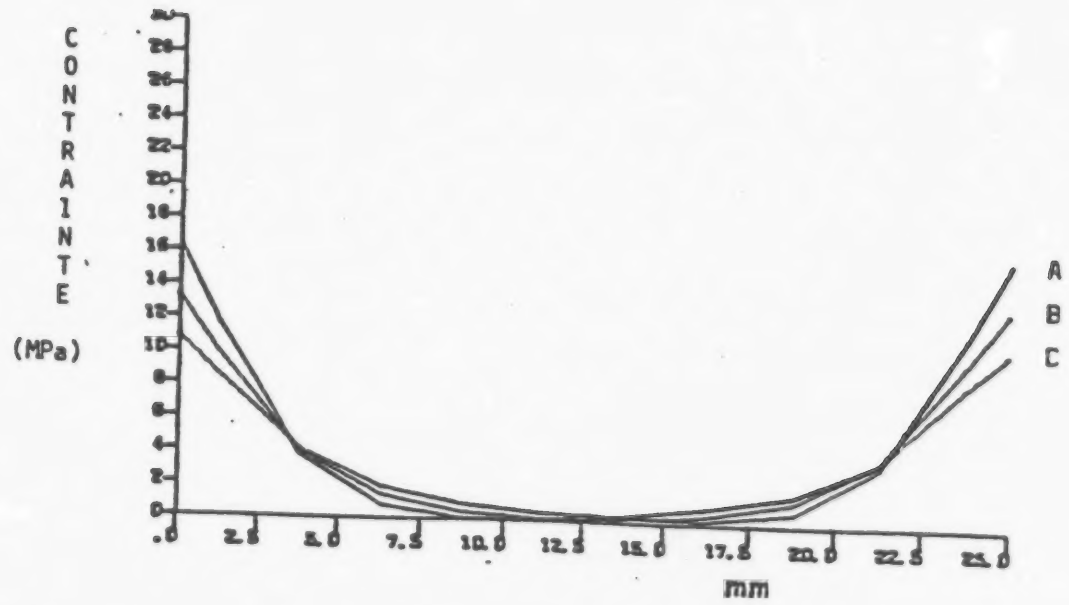
2. Trait pointillé "A" - 1mm Epaisseur du support collé par acrylique renforcé.

DISTRIBUTION DES CONTRAINTES EN FONCTION
DE L'EPAISSEUR DU SUPPORT
(acier/acier)



"A" : 0,2
"B" : 0,8
"C" : 0,0125

DISTRIBUTION DES CONTRAINTES
EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DU SUPPORT
(SMC collé avec acrylique renforcé)
PERMABOND F 246



Note 1. Tracé "A" - 1mm épaisseur de SMC
" "B" - 2mm " "
" "C" - 4mm " "

LES ADHESIFS RENFORCES

Les calculs montrent que sous charge de 2 KN, le joint de composite SMC de 1mm et d'adhésif polyester sera sur le point de se rompre à cause des effets conjugés de la charge de traction dans le SMC et la contrainte imposée en surface par l'adhésif. Comme l'acrylique plus souple répartit bien mieux la contrainte , il est très probable qu'un assemblage de SMC en 1mm et d'acrylique supportera des forces de traction quelque 50 à 60 % plus élevées. Cependant cette capacité à supporter des contraintes plus importantes varie avec la géométrie du joint - mais ne descendra pas en dessous de 30%. Egalement, la souplesse de l'acrylique permet de s'accommoder bien mieux des forces de pelage et de cisaillement - un sujet qui sera traité au moment voulu.

EXEMPLE 2 :

Evolution dans la REPARTITION DES CONTRAINTES en fonction du TYPE DE SUPPORT et d'adhésif.

D14 - D 15 : Distribution des contraintes sur assemblage acier/acier et acier/SMC

L'exemple suivant compare les graphes de répartition des contraintes qu'un modèle simple mais efficace est en mesure de prévoir, pour une charge donnée, sur des joints importants (mais non exceptionnels) acier/acier et acier/composite dont les caractéristiques sont les suivantes :

Matériaux :

Supports	- acier doux et composite de base époxy
Adhésifs	- soit époxy monocomposant "renforcé" polymérisant à chaud soit acrylique "renforcé".

Géométrie du joint

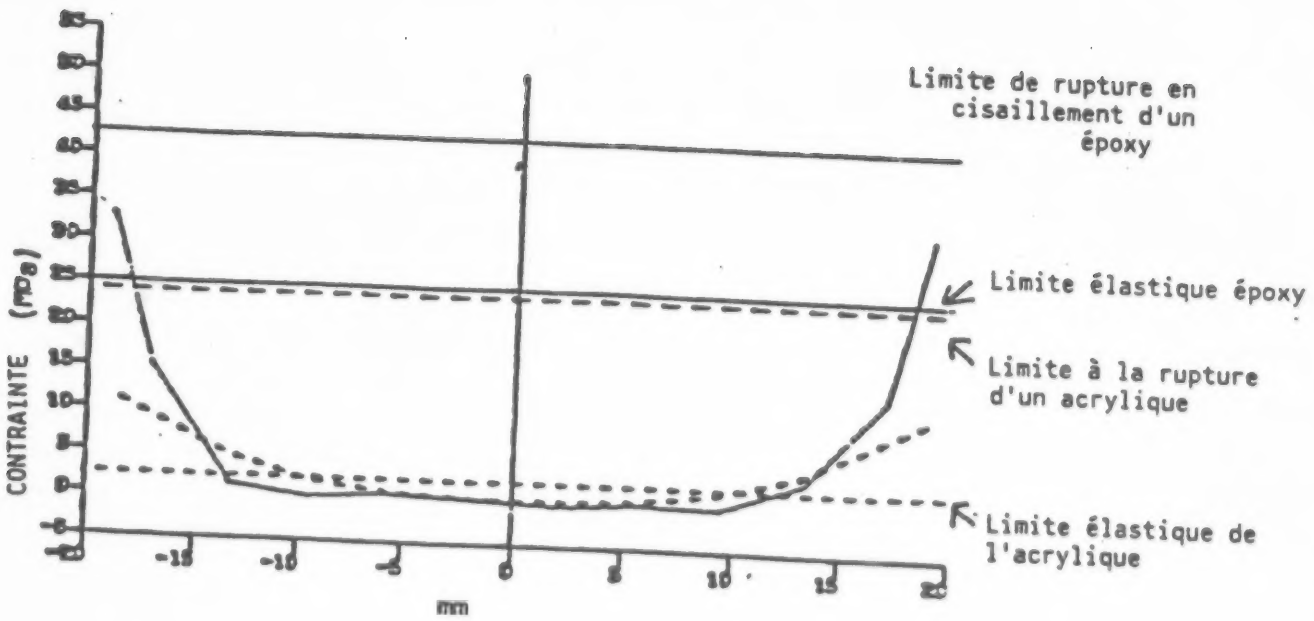
Description	- simple recouvrement
Largeur	- 75 mm
Longueur de recouvrement	- 38 mm
Epaisseur du support	- 1 mm
Epaisseur de l'adhésif	- 0.05 mm

Contrainte

En traction	- 10 KN

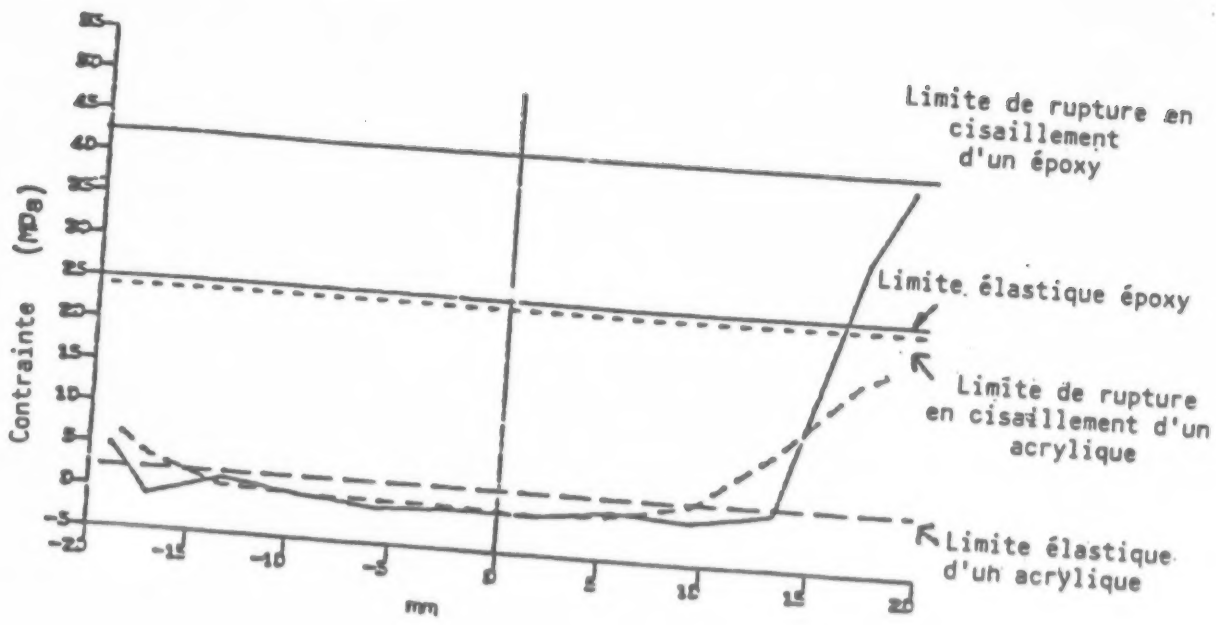
Il est intéressant de souligner que ces adhésifs lorsqu'ils sont étudiés de manière conventionnelle possèdent des caractéristiques de "puissance" similaires. Il est vrai que les deux peuvent déformer l'acier doux mais ils diffèrent fondamentalement dans leurs performances pratiques lorsqu'ils sont évalués correctement. Dans l'illustration D14 - joint acier/acier - la répartition des contraintes pour les deux adhésifs est symétrique. Cependant, l'effort concentré en bout de joint est moins important dans le cas de l'adhésif acrylique. Etant souple, celui-ci répartit la charge plus aisément et sur une plus grande surface que l'époxy, plus rigide.

DISTRIBUTION DES CONTRAINTES DANS UN ASSEMBLAGE ACIER/ACIER



Trait plein : Epoxy renforcé PERMABOND ESP110
Trait pointillé : Acrylique renforcé

DISTRIBUTION DES CONTRAINTES DANS UN ASSEMBLAGE ACIER/SMC



Trait plein : époxy renforcé
Trait pointillé : adhésif renforcé

LES ADHESIFS RENFORCES

Dans l'illustration D15 - acier/composite - la courbe de répartition est tout à fait différente. Dans ce cas, toute la contrainte est supportée par une extrémité du joint. Ce changement est dû à l'emploi d'un composite, ce matériau possède en effet un module plus bas que l'acier qu'il a remplacé. Dans ce cas la valeur maximum de la contrainte transmise à travers le joint sera plus importante que précédemment car toute la charge se concentre à une extrémit' de l'asssemblage. Mais il y a toujours une différence entre les courbes de répartition des contraintes, en fonction de l'adhésif à cause du plus grand degré de répartition de l'effort dans l'acrylique plus souple. Ceci est très important car chaque fois que ce type de joint particulier subit une surcharge, la surface fragile du composite sera toujours moins soumise aux efforts transmis par l'adhésif acrylique plus souple qu'avec l'époxy très rigide.

Ainsi, dans le cas de matériaux composites, en présence de contraintes élevées et lorsque des recouvrements importants sont possibles, des adhésifs souples vont se comporter mieux que des types plus rigides. Mais, lors de réalisations critiques une analyse soigneuse sera nécessaire pour déterminer la meilleure combinaison contrainte/support/adhésif et géométrie du joint.

Illustration D12 :

REPARTITION DES CONTRAINTES en fonction de l'EPAISSEUR du support :

Collage de SMC composite avec ADHESIF RESINE POLYESTER.

Note : 1 Ligne pleine "A" - 1mm épaisseur de SMC
Ligne pleine "B" - 2mm épaisseur " "
Ligne pleine "C" - 4mm épaisseur " "
2 Ligne pointillé "A" - 1mm épaisseur du support collé par acrylique "renforcé"

Illustration D13

Répartition des contraintes en fonction de l'EPAISSEUR DU SUPPORT :

Collage de SMC composite avec ADHESIF ACRYLIQUE "RENFORCE".

Note : 1 Ligne pleine "A" - 1 mm épaisseur de SMC
Ligne pleine "B" - 2 mm épaisseur " "
Ligne pleine "C" - 4 mm épaisseur " "

Illustration D14

REPARTITION DES CONTRAINTES dans un assemblage ACIER/ACIER en fonction du type d'adhésif pour une LONGUEUR DU JOINT DONNEE.
Adhésifs utilisés : Epoxy monocomposant "renforcé" (Rigide)
Acrylique "renforcé" (Souple)

Note :
---- Les lignes en pointillés se réfèrent à l'adhésif acrylique
Les ligne pleines à l'adhésif époxy.

Illustration D15

REPARTITION DES CONTRAINTES dans un assemblage ACIER/COMPOSITE POLYESTER fibres de verre (SMC).
Adhésifs utilisés : Epoxy monocomposant "renforcé" (Rigide) - Courbe en continue
Acrylique "renforcé" (Souple) - Courbe en pointillé

Note :
---- Cette charge peut être supportée si elle est statique mais si elle est cyclique elle provoquera la rupture du joint car les deux adhésifs sont mis en contrainte au-delà de leur limite élastique.

En l'absence de tels programmes spécialisés il est préférable de prévoir que dans le cas d'une feuille de métal d'1mm d'épaisseur, si l'on emploie un adhésif rigide, la contrainte sera supportée par les seuls premiers 6mm des extrémités des parties se recouvrant. C'est la raison pour laquelle une structure, destinée à supporter une contrainte quelconque, doit avoir au moins 12 mm de recouvrement. Lorsque ce minimum est dépassé, la partie centrale cesse d'être surchargée d'une façon significative, sauf en cas de contraintes particulièrement importantes. La démonstration en est faite dans l'exemple suivant.

Exemple 3 :

REPARTITION DES CONTRAINTES en fonction de la LONGUEUR de recouvrement.

Caractéristiques du joint :

Matériau :	support	: acier doux
	adhésif	: époxy rigide "renforcé"
Géométrie du joint :		
	Description	: recouvrement simple
	Largeur	: 25 mm
	Longueur de recouvrement	: variable : 9-12-19-25 et 38mm
	Epaisseur du support	: 1 mm chacun
	Epaisseur de l'adhésif	: 0.05 mm
Contrainte :	En tension	: 7 KN

LES ADHESIFS RENFORCES

Les différentes courbes générées par la contrainte à mesure que la longueur de recouvrement change sont illustrées dans la Figure D16.

L'effet de l'augmentation sur la résistance apparente du joint est montré schématiquement dans la Figure D17. On y voit clairement la non linéarité de l'effet qui est généralement mal compris mais qui signifie qu'au delà d'un certain point, il n'est plus possible d'augmenter la résistance d'un joint simplement en augmentant sa longueur de recouvrement.

Figure D16 :

Evolution de la REPARTITION DES CONTRAINTES en fonction de la LONGUEUR DE RECOUVREMENT DU JOINT acier/acier.

Note :
---
1. Pour les longueurs X, Y et Z les courbes de contraintes sont globalement similaires, bien que de façon évidente la région centrale non chargée soit réduite dans les joints de longueur de recouvrement courtes.
2. Avec 12 mm, la contrainte doit être supportée dans les régions centrales.
3. Avec 6 mm, non illustrée, le joint ne supportera pas du tout la contrainte.
4. Bien qu'initialement important ce joint permet une comparaison lorsque sa taille est réduite. Il permet la comparaison de son maximum avec les joints typiques composite/composite et composite/acier.
Voir particulierement les Figures D14 et D15 .

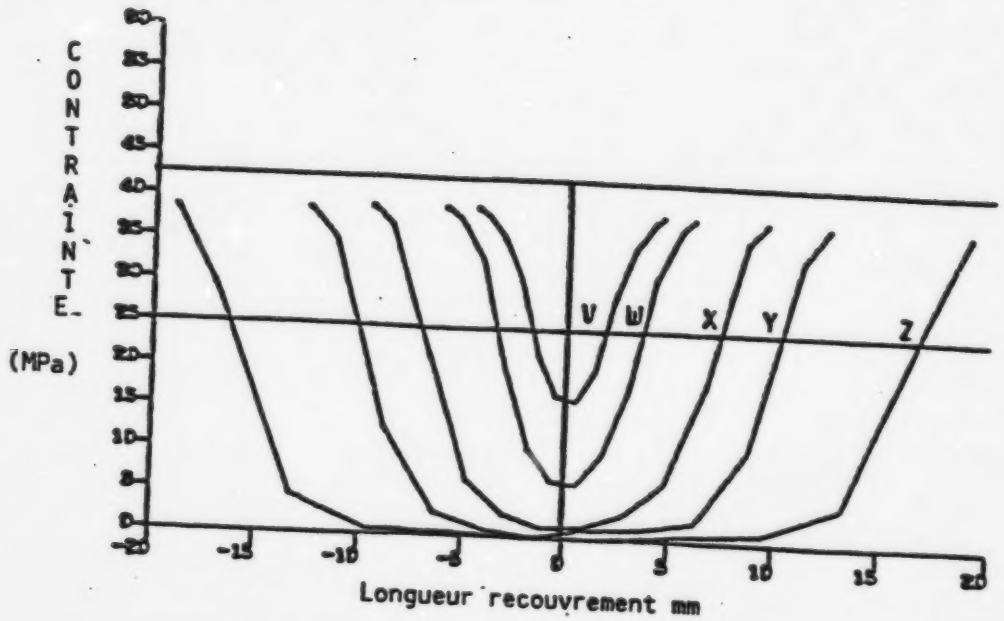
Figure D17 :

Représentation schématique de la PERTE APPARENTE de résistance au CISAILLEMENT par l'accroissement DE LA LONGUEUR DE RECOUVREMENT.

La comparaison entre les figures présentées dans les exemples 2 et 3 montre qu'en gros les prévisions de recouvrement pour les joints en acier doivent être approximativement doublées pour les composites collés avec des adhésifs souples.

On montre dans la Figure D17 qu'aussitôt que le recouvrement atteint le point où les régions centrales du joint ne sont plus en contrainte, la résistance de ce joint ne peut plus être améliorée simplement en augmentant la longueur du recouvrement. Pour améliorer sa résistance il faudra changer d'autres paramètres tel que la largeur de ce joint, l'épaisseur ou la nature du support ou en substituant un adhésif plus adapté. Toutefois, un recouvrement accru donnera une meilleure résistance à la fatigue et au fluage ainsi qu'aux conditions d'environnement.

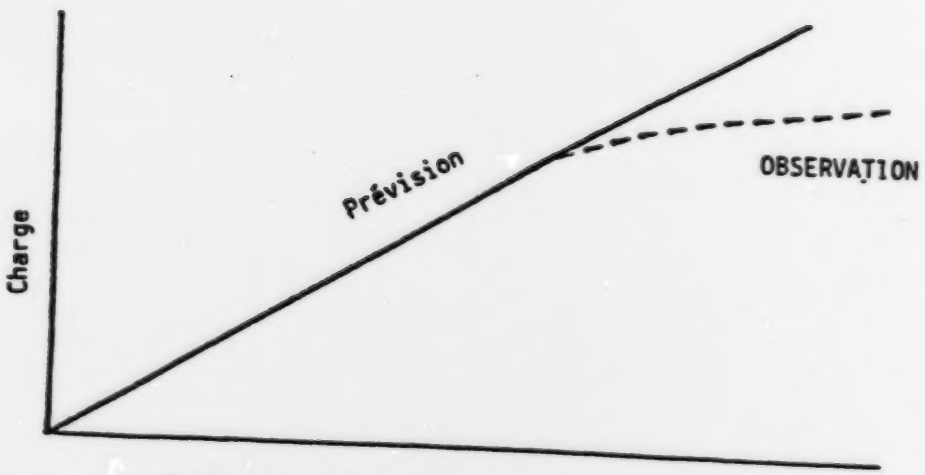
VARIATION DE DISTRIBUTION DE CONTRAINTES
EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE RECOUVREMENT
DU JOINT



V = 9mm
W = 12mm
X = 19mm
Y = 25mm
Z = 38mm

Adhésif époxy renforcé sur acier/acier

TENUE AU CISAILLEMENT EN FONCTION DE L'AUGMENTATION DE LA LONGUEUR DE RECOUVREMENT



EPOXY RENFORCE ESP 110

LES ADHESIFS RENFORCES

Jusqu'ici, on n'a pas tenu compte de l'épaisseur de l'adhésif dans le joint. La sagesse populaire recommande que pour optimiser la résistance au cisaillement, l'épaisseur de colle soit la plus faible possible. Cependant, la résistance au pelage croît habituellement avec l'épaisseur du joint de colle pour les adhésifs souples et "renforcés". Ceci est très important, car en fait, ce sont ces forces de pelage et de clivage induites par les impacts accidentels qui pratiquement détruisent l'assemblage.

4.2 - Conception des joints

Il faut tenir compte de plusieurs considérations pratiques qui s'ajoutent au problème physique de pouvoir assembler des composants suffisamment bien pour réaliser un joint efficace. Par exemple, lorsqu'il faut assembler deux composants en utilisant une configuration de recouvrement, le fait de mettre en forme une des parties - peut-être une légère dentelure - pourra permettre un meilleur positionnement de la seconde partie.

De même,il faut prendre garde au choix de l'adhésif et de la technique d'assemblage prévue. Il faut éviter que l'adhésif ne soit chassé de la surface au moment de l'assemblage. Les techniques de positionnement et non de glissement doivent être employées de préférence. Le glissement aura tendance à chasser l'adhésif de la région du joint et conduit à la création de poches d'air qui réduisent ainsi les performances de l'adhésif.

Le positionnement de grandes surfaces peut demander une pression considérable afin de répartir l'adhésif. Pour éviter de piéger en même temps l'air, l'un des composants devra être déposé lentement sur l'autre, en commençant de préférence par un bord. La pression sera appliquée si possible d'une manière progressive sur la surface et y sera maintenue

La forme de l'assemblage doit permettre également un positionnement de l'adhésif en utilisant un mode approprié. Des cordons et des croix sont bien adaptés, car une fois les composants positionnés, l'air ne sera pas piégé comme il le serait dans le cas d'un cercle fermé.

On pourra distribuer l'adhésif d'une manière plus précise si on peut le déposer dans une rainure peu profonde, ou juste à côté d'un rebord qui puisse être utilisé comme guide pour le pistolet applicateur.

Enfin, on s'est aperçu que l'excès d'adhésif qui est chassé du joint contribue en fait à la tenue de l'ensemble car la concentration des contraintes est réduite sur ce bord. C'est pourquoi l'adhésif ne doit être essuyé que pour un sur-recouvrement ou pour des considérations d'esthétique.

LES ADHESIFS RENFORCES

Il est évident que le choix de l'adhésif est fondamental. En plus du fait de choisir un type d'adhésif répondant aux contraintes principales de tout projet, l'ingénieur doit tenir compte des points suivants :

L'adhésif le mieux adapté doit :

- être manipulable sans danger

- être stockable facilement

- être sans mélange obligatoire

- se distribuer aisément avec un équipement simple pouvant se prêter à l'automation.

V - ETUDE DE CAS PRATIQUES + DEVELOPPEMENT

Plutôt que de tirer des concepts généraux des principes énoncés, nous allons nous intéresser à des applications pratiques.

1) Collage métal-métal :

F241-F246	Bateau de débarquement (Al/Al) Bus (plaques de revetements) (Al/Al) Préparation de surface particulière
ESP110	Tracteurs CASE (acier/acier) Poutrelle ou profilés collés Tronçonneuse (Al/Al) Application à la polymérisation pour industrie

2) Collage métal/composites

F246	Tablettes TGV
ESP110	Arbre de transmission 205
VOX	Raidisseurs sur plaques composites

VI - CONCLUSION

Nous nous sommes efforcés de démontrer que le collage, en particulier sur des matériaux homogènes ou composites est une technique complexe, qui nécessite une bonne connaissance des adhésifs, des matériaux et des états de surfaces, et de leurs caractéristiques mécaniques.

Au delà de ces connaissances primaires, il importe de développer la connaissance du comportement du joint collé dans son ensemble et sa résistance aux contraintes et à l'environnement. Il est nécessaire de rassembler ces différents paramètres, afin de créer des modélisations qui seront les bases de véritables conceptions de joints collés et de leurs supports.

VHB: A NEW GENERATION OF ADHESIVES FOR METAL FABRICATION

by

Lester Gombas

3M Canada
P.O. Box 5757
London (Ontario)
M6A 4T1

(Manuscript not available on time)

RAIDISSEURS DE MURS-RIDEAUX

par

Guy St-Jean

Tech-Nar Inc.
850 boul. Simard
Chambly (Québec)
J3L 4LX2

Le Collage Structural des Métaux
CNRC/IGM, 29 mars 1988, Boucherville (Québec)

Tech-Nar est une compagnie qui se spécialise dans la fabrication de panneaux architecturaux en aluminium, en acier et en acier inoxydable.

J'ai personnellement 20 années d'expérience dans le domaine des produits architecturaux touchant plus précisement l'industrie du mur rideau en aluminium ainsi que les travaux se rapportant sur le métal en feuille.

Le Conseil National de recherches du Canada nous ont demandé de faire une brève présentation sur le collage afin de pouvoir vous expliquer certains avantages qu'il y a à se servir de colle dans une production.

Nous employons régulièrement de la colle dans notre production et cela depuis environs 5 ans. Dernièrement le Conseil National de recherches nous aidé dans certaines recherches et expertises afin de continuer à développer l'utilisation et les avantages du collage.

Comme je viens de vous le mentionner notre histoire avec la colle a débuté il y a 5 ans, notre intérêt vis-à-vis le collage était basé sur certains inconvénients et perte de temps que le genre de production qu'est la nôtre nous occasionnait. C'est à partir de ce moment qu'on a commencé à faire des recherches et des essais de différents produits, on c'était dit que si dans l'avionnerie il y avait des pièces collées il devrait bien y avoir un produit qui existe et que l'on pourrait intégrer à notre système de production.

Ce qui était important pour nous, était de trouver un produit qui soit à la fois structural et qui pouvait s'activer rapidement afin de pouvoir manipuler les pièces dans un temps maximum de I à 2 minutes.

Maintenant je vais vous expliquer notre système ainsi que les avantages que le collage nous a apporté.

Concernant les avantages qui existent chez nous, nous retrouvons les items suivants,soit:

1- Rapidité de production
2- Aucune perte de matériel
3- Main d'oeuvre moins spécialisée
4- Aucun équipement dispendieux versus homme, c'est à dire que si il y a de la soudure, une machine à souder coûte entre $4,000.00 et $7,000.00 et si on emploie la méthode standart que l'on utilisait auparavant on parle d'une machine qui coûte entre $5,000.00 et $6,000.00.

Nous nous sommes rendus compte qu'en utilisant de la colle nous pouvions comptabilisé une économie d'environs de I0% à I5% des coûts normalement encourus par la méthode standart dans notre production.

Il y a aussi le fait que la colle n'affecte pas et ne déforme pas le produit de base qui est une feuille de métal de différente épaisseur, donc aucune perte de matériel ou refus du produit fini par le client dû à certaines déformations qui aurait pu échapper au contrôle de qualité à l'usine, ce qui s'avère encore là une économie de temps et d'argent.

Notre travail consiste à adapter des feuilles d'aluminium de différents alliage et différente épaisseur (en général l'épaisseur est de .I25") ainsi que des feuilles d'acier et acier inoxydable avec des extrusions d'aluminium ou autres genres de pièces afin d'en faire un panneau. les extrusions servent de renfort à la feuille et/ou d'attaches servant à fixer le panneau au mur.

Pour nous les méthodes d'assemblage des pièces qui existes sont les suivantes:

1- Souder les extrusions à la feuille.
2- Fixer les extrusions à la feuille à l'aide de goujon soudé (studs) sur la feuille.
3- Coller les extrusions sur la feuille

La méthode no. I, soit souder les pièces, serait la plus rapide s'il n'existait certains inconvénients, comme par exemple:

- La soudure doit être faite avant que le fini soit appliqué sur la feuille.
- La soudure pourrait servir seulement si le fini serait peinturé et même à cela nous serions obligé de sabler les feuilles aux endroits qui ont été déformés par la soudure.
- Lorsque le fini est anodisé il n'est pas question d'employer de la soudure dû au fait que nous ne pouvons pas sabler les feuilles à cause du sens du grain sur l'aluminium.

C'est pourquoi nous ne pouvons pas nous servir de la soudure car cette méthode serait beaucoup trop onéreuse lorsqu'il y a une grande quantité de panneaux. Même lorsque l'on travaille sur des feuilles en acier qui normalement ont une épaisseur de .063" (cal. I6) et que l'on fixerait les pièces en appliquant de la soudure par point il en résulte que la surface apparente reste marquée et cela même après la peinture.

La méthode no.2 qui est la plus courante, mais renferme elle aussi beaucoup d'inconvénients, le système consiste à fixer et/souder des goujons (studs) à environs à tous les 9" C/C et lors de l'application de ces goujons nous avons un rejet d'environs I5% dû à une mauvaise prise sur la feuille, les autres inconvénients sont:

- En général ces goujons doivent être appliqués avant la finition sur les feuilles, cela nous oblige à manipuler les feuilles avec beaucoup de soin et à les emballer d'une façon spéciale.
- Lorsque ces feuilles reviennent à l'usine, certains goujons sont écrasés et même arrachés, ce qui nous oblige à les remplacer, donc la possibilité d'endommager les feuilles.

Méthode no.2 - suite.

- Même si ces goujons sont très bien appliqués ils déforment un peu le côté apparent de la feuille et reste marqués après la finition.
- Lors de l'assemblage des pièces à la feuille, soit par un manque de contrôle de pression au vissage des écrousàla feuille peut se déformer de façon à être une perte.
- Toujours lors de l'assemblage si un goujon est mal fixé à la feuille, cette feuille doit revenir au point de départ puis retourner à l'assemblage.
- Beaucoup de calcul sont nécessaire de la part des dessinateurs afin de s'assurer que les goujons soient fixés aux bonsendroits sur la feuille ainsi que la perforation des extrusions doit concorder avec la localisation des goujons.
- Beaucoup plus d'opération, soit la préparation de gabarit, la perforation des extrusions.
- L'achat de feuille d'aluminium de qualité supérieure.

La méthode no.3 s'avère la plus intéressante et en conséquence la plus rapide. L'avantage du collage est la rapidité d'assemblage qui est comme je l'ai déjà dit de I0% à I5% plus productif.

- Nous pouvons travailler avec les feuilles déjà finies sans aucun danger d'endommager le côté apparent.
- Nous avons beaucoup moins de manipulation de matériel.
- Il y a moins d'opération à exécuter sur le matériel, gabarit, perforation etc.
- Moins de calcul de la part des dessinateurs.
- La main d'oeuvre nécessaire au collage n'a pas besoin d'être spécialisée comme un soudeur par exemple, qui est plus dispendieux pour la compagnie.

Economiquement cette méthode permet d'infiltrer sur le marché un produit fini à des coûts moindres qu'auparavant et incite les clients éventuels à choisir le produit qui pourrait s'approcher beaucoup plus de leurs budgets.

Etant un nouveau procédé, une nouvelle technologie ainsi qu'une nouvelle application, cela va sans dire que les employés affectés au collage doivent recevoir un entraînement et surtout être sensibilisé à cette nouvelle application, parce qu'une pièce mal collé peut occasioné beaucoup de problème à la compagnie.

Nous avons la certitude que si plus de compagnie utiliserait le système de collage dans leur production respectif il s'en avérerait une économie générale, ainsi de cette façon il y aurait la possibilité de transfert de connaissance d'une compagnie à une autre ce qui pourrait probablement avoir comme effet encore une amélioration à la production.

En espérant que ces informations peuvent vous mettre en confiance avec le procédé du collage et qu'elles pourront vous être utiles dans avenir prochain.

Je vous remercie tous de votre attention.

COLLAGE DE REFROIDISSEURS EN ALUMINIUM

par

Jean Genest

Les Échangeurs de Chaleur Universels Inc.
1045 rue Hickson
Verdun (Québec)
J4G 2L3

Le Collage Structural des Métaux
CNRC/IGM, 29 mars 1988, Boucherville (Québec)

La compagnie "Les Échangeurs de Chaleur Universel Inc.", est heureuse de participer à ce séminaire et de vous présenter son **nouveau produit** le refroidisseur d'huile "**UNIKOOL**".

Tout d'abord, j'aimerais vous faire un bref historique de la compagnie afin de vous permettre de mieux comprendre les motifs qui l'ont amenés à se tourner vers la **technologie du collage** pour son nouveau refroidisseur d'huile.

La compagnie, fondée sous le nom "**Les Radiateurs Universel Inc.**" en 1956, était vouée à la réparation de radiateurs automobiles et industriels. La compétition devenant très forte sur le marché de l'automobile, la compagnie décide de changer son orientation vers la réparation et fabrication de radiateurs ainsi que des échangeurs de chaleur industriel et commercial, de type air à liquide, ce qui inclus bien sûr les refroidisseurs d'huile.

A ce moment, la compagnie fabriquait tous ses échangeurs avec des tubes à ailettes intégrals d'aluminium dont le tube intérieur est en cuivre.

Suite à une soumission pour la fabrication de refroidisseurs d'alternateurs pour Marine Industries au Complexe LG-4 un contrat nous est accordée "**sous condition**". Cette condition émise pour l'obtention dudit contrat est justement que nous fabriquions nos propres tubes. Auparavant, les tubes provenaient d'une compagnie ontarienne.

D'ailleurs, ce contrat permit à la compagnie "Les Échangeurs de Chaleur Universel Inc." une division de "Les Radiateurs Universel Inc." de débuter ses activités.

Durant cette époque, la compagnie fabriquait toujours des refroidisseurs d'huile pour le marché de remplacement. Notre industrie remplacait n'importe quel refroidisseur d'huile dans les mêmes dimensions, sauf bien entendu ceux fabriqués entièrement en aluminium.

Maintenant, avec l'arrivée de l'outillage nécessaire pour fabriquer nos propres tubes, nous avons la possibilité de fabriquer nos tubes entièrement en aluminium pour le remplacement des refroidisseurs d'huile.

Suite à des essais, nous avons réussi à fabriquer le tube tel qu'utilisé présentement dans les refroidisseurs "**UNIKOOL**"".

Bien sûr, des avantages et des inconvénients propres aux refroidisseurs fabriqués entièrement en aluminium sont à considérer.

AVANTAGES:
- Prix
- Poids
- Efficacité

INCONVÉNIENTS:
- Assemblage
- Résistance à la pression
- Résistance à la corrosion
- Problèmes de réparation

Il fallait donc réussir à mettre sur le marché un refroidisseur d'huile avec les mêmes avantages mais sans les inconvénients.

1° Prix: Aucun problème car nous fabriquons toutes les composantes.

2° Poids: Fabrication entièrement en aluminium.

3° Efficacité: La compagnie a développé un turbulateur pour augmenter le coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur du tube et fait faire par l'Université Concordia les courbes de performances qui lui ont donné satisfaction.

4° Assemblage: Le problème majeur se situait à ce niveau. En ce qui concerne l'assemblage des côtés et des connections nous ferons cela au TIG (Tungsten Inert Gas) mais pour joindre le tube au réservoir, nous ne pouvions utiliser ce procédé car la paroi du tube était trop mince, il restait donc la possibilité du brazage, mais nous savions que les problèmes de corrosion de nos compétiteurs étaient dus au "**FLUX**" utilisé pour le brazage qui était très corrosif.

Ayant entendu parlé d'un tout nouveau procédé appelé **NOKOLOC**, nous nous sommes rendus au Centre de Recherche de la compagnie Alcan où ce procédé de brazage à l'aide d'un flux non corrosif avait été mis au point, malheureusement la différence d'épaisseur des matériaux à joindre était trop grande et nous empêchait d'utiliser ce procédé.

Il fallait donc trouver une solution et le collage nous est apparu être la solution la plus adéquate.

Puis vient le choix de la colle, elle devait:

- Résister à la vibration
- Résister à l'huile
- Garder ses propriétés à 200°F
- Assurer une étanchéité parfaite
- Être facile à appliquer
- Ne pas avoir de vapeur nocive

Les premiers essais faits avec des résines anaérobique ne répondaient pas à nos critères de résistance de vibration et l'utilisation d'un activateur nous agacait quelque peu.

Suite à plusieurs tentatives, nous avons trouvé une résine à base d'époxy en une composante qui répondait à la majorité de nos critères. Sauf pour la facilité d'application due à sa grande viscosité et qui demandait de la cuisson nous avons opté finalement pour cette résine (Permabond ESP 110).

La cuisson à l'infrarouge un côté à la fois a réglé le problème de viscosité car la colle devevant plus liquide à haute température se répartissait également.

5° Résistance à la pression:

Le réservoir étant une extrusion d'aluminium tout comme le tube, il n'y avait aucun problème à ce niveau contrairement aux tubes plats.

D'ailleurs, des essais sur le tube nous ont démontré aucune déformation du tube à une pression hydrostatique de 2500 PSI.

6° Résistance à la corrosion:

L'utilisation d'une colle au lieu du brazage venait éliminer tout risque de corrosion due au **"FLUX"**.

7° Problème de réparation:

La construction étant de tubes individuels, il est facile de bloquer un tube qui fuit. De plus, nos recherches pour trouver une colle adéquate nous ont permis de trouver une nouvelle solution pour les problèmes mineurs à l'aide de résines anaérobiques qui agit par capilarité.

Nous avions donc réglé tous les inconvénients et gardé tous les avantages des refroidisseurs fabriqués entièrement en aluminium. Il ne nous restait maintenant qu'à en faire **"la mise en marché."**

Présentement, seulement le joint du tube au réservoir est fait par collage, les connections et côtés sont soudés au **TIG.**

La raison pour laquelle nous ne fabriquons pas entièrement le refroidisseur par collage est strictement au point de vue **"marketing"** et nous pensons bientôt mettre sur le marché la deuxième génération de refroidisseur **"UNIKOOL"**, mais cette fois entièrement collé.

Nous en sommes qu'à nos débuts et à l'heure actuelle seulement quelques unités sont en service, mais nous sommes certains de la qualité de notre produit. D'ailleurs, des tests de vibration ont été effectués par le CRIQ, selon la norme militaire MIL-STD-810C CAT. F, procédure VIII, en plus d'être soumis à une pression de 200 PSI d'huile à 70°C, et se sont avérés concluants.

Pour conclure, je vous dirai que pour notre entreprise la technologie du collage est prometteuse et que nous n'hésiterons pas à l'intégrer partout où cela s'avèrera nécessaire.

Je vous remercie de votre bonne attention à la présente et n'hésitez pas à nous contacter si vous désirez de plus amples renseignements sur nos produits.